

**A importância do estudo da fraturação de um
maciço rochoso em modelos hidrogeológicos de
águas termais. Um caso de estudo.**

Dulce Pereira da Silva

Dissertação realizada para a obtenção do grau de Mestre no âmbito do
Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Professora Dr.^a Renata Maria Gomes dos Santos (Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

Coorientador: Professor Dr. Joaquim Eduardo Sousa Góis (Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

Arguente: Professora Dr.^a Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes
(Universidade do Minho)

Presidente do Júri: Professor Dr. José Soeiro de Carvalho (Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

Novembro de 2017



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL

VoIP/SIP: feup@fe.up.pt ISN: 3599*654



Telefone: +351 22 508 14 00



Fax: +351 22 508 14 40



URL: <http://www.fe.up.pt>



Correio Eletrónico: feup@fe.up.pt

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2015/2016
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Tel.: +351-22-508 196
Fax: +351-22-508 1448

Editado por:

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Rua Dr. Roberto Frias
4200-465 PORTO
Portugal

Tel.: +351-22-508 1400
Fax: +351-22-508 1440

✉ Email: feup@fe.up.pt

🌐 URL: <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente - 2016/2017- Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir da versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Agradecimentos

Quando iniciei esta dissertação, não tinha a noção da dificuldade que teria em terminá-la, muito menos de todos os contratempos que foram surgindo ao longo do tempo. Desta forma, aqui deixo o meu sincero agradecimento às seguintes pessoas:

Aos Professores Doutores e Orientadores Renata Santos e Joaquim Góis, pela compreensão e disponibilidade que sempre demonstraram, pelas palavras de motivação e muita paciência, sem as quais nunca teria conseguido finalizar este trabalho. À Professora Doutora Renata, o meu agradecimento especial, pelas horas passadas no campo a medir fraturas, sob um calor imenso.

Aos meus pais e ao meu irmão pela paciência, carinho e apoio incondicional ao longo de todo o meu percurso académico. À minha mãe, pela força que sempre me transmitiu e ao meu pai que me ensinou a nunca desistir. Ao meu irmão, por me ensinar a ver o lado bom da vida.

Às pessoas que o percurso académico colocou na minha vida, em particular à Raquel, Kristina, Leonor e Filipa. Obrigada por todo o apoio, os cafés, os risos, as neuroses partilhadas e muitas diretas feitas ao longo destes anos. Sem vocês, teria sido muito mais difícil.

Ao Alexandre, pelas palavras de incentivo ao longo desta jornada principalmente nas horas mais difíceis, estando na mesma jornada que eu.

À Catarina e ao Bruno, ao Gonçalo, à Ana Isabel e ao Fernando, obrigada pelas palavras de incentivo, por todas as saídas de fim de semana e por estarem sempre disponíveis para me ajudarem em todas as adversidades.

Ao Daniel, por todos estes anos de amizade, pelas palavras sábias, e por vezes duras, e muitas vezes de consolo, que tantas e tantas vezes precisei de ouvir ao longo deste percurso académico. Um especial obrigado pela paciência, por todos os telefonemas e mensagens fora de horas.

A todas as outras pessoas que me marcaram ao longo da minha vida, o meu profundo agradecimento.

Resumo

A análise geológica-estrutural tem especial destaque nas ocorrências hidrotermais, uma vez que estas se encontram correlacionadas com redes de fraturação megascópicas, mas sobretudo com redes de fraturação regional e local. Em maciços fraturados, estas são definidoras do escoamento e por isso apresentam implicações quer na organização da rede hidrográfica superficial, quer no fluxo de água subterrâneo.

Nesta dissertação, o objetivo principal é o estudo da fraturação local e regional de um maciço rochoso com o intuito de ajudar na interpretação do modelo hidrogeológico das termas de Fonte Santa, junto ao rio Côa (Almeida, Guarda).

São apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação da técnica de amostragem linear de descontinuidades em superfícies expostas do maciço rochoso das termas. No local foram selecionados diversos afloramentos recorrendo-se a diversas ferramentas: cartografia geológica, análise morfotectónica e geologia estrutural. É ainda utilizada informação sobre a fraturação regional, obtida pela análise morfoestrutural, mapas geológicos e o modelo hidrogeológico local. É verificado que conforme se caminha em direção ao rio Côa existe uma degradação das condições do maciço, assim como um aumento da fraturação existente.

Foram utilizados métodos estatísticos no tratamento dos dados de campo com o objetivo de se definir famílias de descontinuidades e de caracterizar estatisticamente a atitude geológica das mesmas, de forma a verificar a existência ou não de uma direção preferencial das descontinuidades.

Com este estudo foi possível compreender que ocorre a mistura de águas meteóricas com águas termais, influenciando todo o sistema hidrogeológico local.

Palavras-chave: fraturação local, fraturação regional, modelo hidrogeológico, águas termais, hidrogeologia, amostragem linear, estatística circular.

Abstract

The geological-structural analysis is especially noteworthy in hydrothermal occurrences, since they are correlated with megascopic fracturing networks, but mainly with regional and local fracturing networks. In fractured massifs, these are defining the flow and therefore have implications both in the organization of the surface hydrographic network and in the flow of groundwater.

In this dissertation, the main objective is the study of the local and regional fracturing of a rocky massif with the purpose of helping to interpret the hydrogeological model of the spa of Fonte Santa, near the Côa river (Almeida, Guarda).

The results obtained through the application of the linear sampling technique of discontinuities on exposed surfaces of the rocky massif of the thermal baths are presented and discussed. At the site several outcrops were selected using several tools: geological mapping, morphotometric analysis and structural geology. Information on regional fracturing obtained by morphostructural analysis, geological maps and the local hydrogeological model is also used. It is verified that as one moves towards the river Côa there is a degradation of the conditions of the massif, as well as an increase of the existing fracturing.

Statistical methods were used in the treatment of field data to define families of discontinuities and to characterize their geological attitude statistically in order to verify the existence or non - existence of a preferential direction of the discontinuities. With this study it was possible to understand the occurrence of meteoric water mixing with thermal waters, influencing the entire local hydrogeological system.

Keywords: local fracturing, regional fracturing, hydrogeological model, thermal waters, hydrogeology, linear sampling, circular statistics.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XV
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. O PAPEL DA FRATURAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE UM MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	2
1.2. ESTRUTURA	3
1.3. METODOLOGIAS E TÉCNICAS	3
CAPÍTULO 2.....	4
CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DOS MACIÇOS ROCHOSOS.....	4
2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DOS MACIÇOS ROCHOSOS	5
2.1. GENERALIDADES	5
2.2. DESCONTINUIDADES	6
2.3. PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	12
2.4. TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR APLICADA A SUPERFÍCIE DE DESCONTINUIDADES	21
2.5. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DAS DESCONTINUIDADES	23
2.5.1. <i>Famílias e sistemas de descontinuidades</i>	23
2.5.2. <i>Representação gráfica das descontinuidades</i>	24
CAPÍTULO 3.....	29
ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO	29
3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO	30
3.1. O MACIÇO IBÉRICO E A OROGENIA VARISCA.....	30
3.2. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO MACIÇO IBÉRICO	31
3.3. ZONA CENTRO-IBÉRICA.....	32
3.4. A ORIGEM E A INSTALAÇÃO DOS GRANITOS	33
CAPÍTULO 4.....	39
ESTATÍSTICA DE DADOS DIRECIONAIS	39
4. ESTATÍSTICA DE DADOS DIRECIONAIS	40
4.1. VETOR UNITÁRIO E RESULTANTE	40
4.2. MÉDIA $\mu=\theta$ E COMPRIMENTO MÉDIO RESULTANTE.....	41
4.3. MODA	42
4.4. MEDIANA	42
4.5. VARIÂNCIA	42
4.6. DESVIO PADRÃO E DISPERSÃO CIRCULAR.....	43

4.7.	COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO E DIREÇÃO MÉDIA DETERMINADA	44
4.8.	ASSIMETRIA E CURTOSE CIRCULAR	44
4.9.	MEDIDAS DE ASSOCIAÇÃO DE DADOS DIRECIONAIS.....	45
A)	CORRELAÇÃO LINEAR-CIRCULAR	45
B)	CORRELAÇÃO CIRCULAR-CIRCULAR	46
4.10.	INFERÊNCIA ESTATÍSTICA.....	47
4.10.1.	<i>Testes paramétricos</i>	47
A)	TESTE DA UNIFORMIDADE CIRCULAR	48
B)	TESTE DE TENDÊNCIA ESPECÍFICA	49
4.10.2.	<i>Testes não-paramétricos</i>	50
A)	TESTE DE WATSON U_N^2	50
B)	TESTE DE KUIPER V_N	51
4.11.	MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES.....	52
4.11.1.	<i>Distribuição de von Mises</i>	52
CAPÍTULO 5.	.....	53
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	.....	53
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	.....	54
5.1.	ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO.....	54
5.1.1.	<i>Breve nota histórica sobre Almeida</i>	54
5.1.2.	<i>Enquadramento geotectónico e geomorfológico regional</i>	55
5.1.3.	<i>Explorações minerais</i>	58
5.1.4.	<i>Caracterização climática</i>	58
5.1.5.	<i>Fonte Santa - local de estudo</i>	59
5.1.6.	<i>Caracterização da fraturação local</i>	63
CAPÍTULO 6.	.....	77
TRATAMENTO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	.....	77
6. TRATAMENTO E DISCUSSÃO DOS DADOS RECOLHIDOS	.....	78
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO SEGUNDO OS PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS	80
6.2.	ESTATÍSTICOS BÁSICOS E TESTES DE AJUSTAMENTO	84
6.3.	DIAGRAMAS DE ROSETA E DIAGRAMAS DE DENSIDADE DE POLOS	87
6.4.	ZONA 1	87
6.5.	ZONA 2	89
6.6.	ZONA 3	91
6.7.	ZONA 4	92
6.8.	ZONA 5	94
A)	ZONA 5.1.....	94
B)	ZONA 5.3.....	95
C)	ZONA 5.5.....	97
6.9.	DISCUSSÃO DOS DADOS RECOLHIDOS	98
CAPÍTULO 7.	.....	102
CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	.....	102
7. CONCLUSÕES	.....	103

7.1. PERSPETIVAS FUTURAS	104
CAPÍTULO 8.....	106
BIBLIOGRAFIA	106
8. BIBLIOGRAFIA	107
ANEXOS	111

Lista de abreviaturas e siglas

BGD - Basic Geotechnical Description

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

ISRM - International Society for Rock Mechanics

ZGTM - Zona Galiza Trás-os-Montes

ZCI - Zona Centro Ibérica

ZOM - Zona Ossa Morena

ZSP - Zona Sul Portuguesa

m - metros

cm - centímetros

mm - milímetros

Índice de figuras

FIGURA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUE PERMITEM DESCREVER UMA FALHA (MATIAS ET AL., 2004).....	7
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE DIÁCLASES SISTEMÁTICAS NUM BLOCO DIAGRAMA (ADAPTADO DE LOCZY E LADEIRA, 1980).	9
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE DIÁCLASES NUM BLOCO-DIAGRAMA (A VERMELHO) (ADAPTADO DE LOCZY E LADEIRA, 1980).	9
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DE UMA FAMÍLIA DE DIÁCLASES NUM BLOCO-DIAGRAMA (A VERMELHO) (ADAPTADO DE LOCZY E LADEIRA, 1980).	10
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE DIÁCLASES NÃO-SISTEMÁTICAS NUM BLOCO-DIAGRAMA (ADAPTADO DE LOCZY E LADEIRA, 1980)	10
FIGURA 6 - DOIS CONJUNTOS DE FRATURAS SÃO APRESENTADAS DE FORMA SISTEMÁTICA NO BLOCO (SINGHAL & GUPTA, 2010).	10
FIGURA 7 - DIAGRAMA DE FRATURAS NUM BATÓLITO GRANÍTICO. (ADAPTADO DE CLOSS, 1931 IN HATCHER, 1995).	11
FIGURA 8 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO O PAPEL DOS PLANOS DE ESTRATIFICAÇÃO E FRATURAS NA MOVIMENTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA VADOSA (SINGHAL & GUPTA, 2010).	12
FIGURA 9 - ATITUDE DE UMA DESCONTINUIDADE (ADAPTADO DE SCESI & GATTIONI, 2009)	15
FIGURA 10 - OBTENÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE DESCONTINUIDADES A PARTIR DE UMA FACE EXPOSTA DE UM MACIÇO ROCHOSO (ISRM, 1978).	16
FIGURA 11 - ESCLERÓMETRO PORTÁTIL.	19
FIGURA 12 - DEFINIÇÃO DE ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES (ISRM, 1978).	19
FIGURA 13 - ESQUEMA PARA O LEVANTAMENTO DE DESCONTINUIDADES ATRAVÉS DA TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR EM FACES EXPOSTAS DO MACIÇO ROCHOSO (SINGHAL & GUPTA., 2010). D - DISTÂNCIA À ORIGEM DA FITA GRADUADA ("SCANLINE"); L- SEMI COMPRIMENTO EXPOSTO.	22
FIGURA 14 - MATERIAL DE CAMPO BÁSICO PARA O LEVANTAMENTO PELA TÉCNICA DE AMOSTRAGEM LINEAR (VALLEJO ET AL., 2002).	23
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES ATRAVÉS DO MÉTODO DE ROSETA (LIMA ET AL., 2012).	25
FIGURA 16 - CÍRCULO MAIOR E POLOS DO PLANO DEFINIDORES DA ORIENTAÇÃO DE UM PLANO (LIMA ET AL., 2012).	26
FIGURA 17 - REDES DE PROJEÇÃO: (A) - IGUAL ÂNGULO (WULLF); (B) - IGUAL ÁREA (SCHMIDT) (LIMA ET AL., 2012).	26
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO DO PLANO N40/40SW E RESPECTIVOS POLOS: (A) - IGUAL ÂNGULO; (B) - IGUAL ÁREA (LIMA ET AL., 2012).	27
FIGURA 19 - REDES POLARES: (A) - PROJEÇÃO IGUAL ÂNGULO; (B) - PROJEÇÃO IGUAL ÁREA (LIMA ET AL., 2012).	27
FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO DOS POLOS DE 387 DESCONTINUIDADES: (A) - PROJEÇÃO IGUAL ÂNGULO; (B) - PROJEÇÃO IGUAL ÁREA (LIMA ET AL., 2012).	28
FIGURA 21 - CURVAS DE ISODENSIDADES DE CONCENTRAÇÃO DE POLOS COM REPRESENTAÇÃO NA FIGURA 24: (A) - PROJEÇÃO IGUAL ÂNGULO; (B) - PROJEÇÃO IGUAL ÁREA (LIMA ET AL., 2012).	28

FIGURA 22 - ZONAMENTO PALEOGEOGRÁFICO DO MACIÇO IBÉRICO E RESPECTIVA TECTÓNICA, SEGUNDO O MAPA TECTÓNICO DA PENÍNSULA IBÉRICA MODIFICADO. (RIBEIRO ET AL., 1979).	30
FIGURA 23 - ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DOS SETORES SETENTRIONAIS DO AUTÓCTONE DA ZCI (AZEVEDO E AGUADO, 2006).....	33
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GRANITOIDES BIOTÍTICOS SIN-F ₃ (ADAPTADO DE FERREIRA ET AL., 1987)	36
FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GRANITOIDES BIOTÍTICOS TARDI-F ₃ (ADAPTADO DE FERREIRA ET AL., 1987).	37
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GRANITOIDES BIOTÍTICOS TARDI-PÓS-F ₃ (ADAPTADO DE FERREIRA ET AL., 1987).	37
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GRANITOIDES DE DUAS MICAS (ADAPTADO DE FERREIRA ET AL., 1987).	38
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DE UM VETOR UNITÁRIO (BARBOSA, 2013).	40
FIGURA 29 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIÂNCIA CIRCULAR (BARBOSA, 2013).	43
FIGURA 30 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95% (BARBOSA, 2013).	44
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE DADOS COM UM COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO CIRCULAR-CIRCULAR ELEVADO (BARBOSA, 2013).	47
FIGURA 32 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE DADOS COM COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO CIRCULAR-CIRCULAR FRACO (BARBOSA, 2013).	47
FIGURA 33 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS DISTINTOS DO TESTE DE RAYLEIGH (BARBOSA, 2013).	48
FIGURA 34 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS DISTINTOS DO TESTE DE RAO (BARBOSA, 2013).	49
FIGURA 35 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO TESTE DE WATSON, ONDE SE REJEITA H ₀ (BARBOSA, 2013).	50
FIGURA 36 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS DIFERENTES PARA O TESTE DE KUIPER (BARBOSA, 2013)	51
FIGURA 37 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO EM PORTUGAL CONTINENTAL E EM PORMENOR A ZONA EM ESTUDO, LOCALIZADA COM O NOME FONTE SANTA (GOOGLE EARTH - 26/04/2017).....	54
FIGURA 38 - FORTALEZA DE ALMEIDA, EM FORMA DE ESTRELA HEXAGONAL (GOOGLE EARTH - 26/04/2017).....	55
FIGURA 39 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E CONTEXTO GEOLÓGICO DO LOCAL DE ESTUDO COM INDICAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO FURO AQ1PERTENCENTES ÀS TERMAS DE ALMEIDA (MIRANDA ET AL., 2016).....	57
FIGURA 40 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS REFERENTES À PRECIPITAÇÃO NO DISTRITO DA GUARDA DESDE 1981 A 2010 (IPMA, 1/04/2017).	58
FIGURA 41 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS REFERENTES À TEMPERATURA DO AR NO DISTRITO DA GUARDA DESDE 1981 A 2010 (IPMA, 1/04/2017).	59
FIGURA 42 - LOCALIZAÇÃO DE FONTE SANTA, LOCAL DE ALVO DE ESTUDO (GOOGLE EARTH - 25/04/2017).....	59
FIGURA 43 - CENTRO TERMAL DE FONTE SANTA.....	60

FIGURA 44 - IMAGEM DE SATÉLITE DO LOCAL ALVO DE ESTUDO, COM DESTAQUE PARA OS SISTEMAS DE FALHAS: A LARANJA ENCONTRA-SE EVIDENCIADO O SISTEMA DE FALHAS NNE-SSW E A VERDE, O SISTEMA WNW-ESE (GOOGLE EARTH - 27/04/2017).	60
FIGURA 45 - PORMENOR DO RIO CÔA ENCAIXADO NO VALE FRATURADO. A LARANJA ENCONTRA-SE EVIDENCIADO O ENCAIXE DO RIO CÔA E A AMARELO A FRONTEIRA COM ESPANHA. (GOOGLE EARTH - 27/04/2017).	61
FIGURA 46 - MODELO HIDROGEOLÓGICO (CORTEZ, 2013).	62
FIGURA 47 - MAPA DO LOCAL DE ESTUDO COM AS RESPECTIVAS ZONAS CARTOGRAFADAS (GOOGLE EARTH, 27/04/2017).	63
FIGURA 48 - VISTA GERAL ZONA 1.	64
FIGURA 49 - AFLORAMENTO GRANÍTICO EVIDENCIANDO O SEU ESTADO DE ALTERAÇÃO E PREENCHIMENTO DAS DIACÁLASES COM MUSGO E VEGETAÇÃO.	64
FIGURA 50 - PORMENOR DO AFLORAMENTO GRANÍTICO COM EVIDÊNCIAS DA PRESENÇA DE FUNGOS E DA ALTERAÇÃO SUPERFICIAL. PRESENÇA DE VEGETAÇÃO ABUNDANTE.	64
FIGURA 51 - VISTA GERAL DA ZONA SEM AFLORAMENTOS, COM DESTAQUE PARA A ABUNDÂNCIA DA VEGETAÇÃO AUTÓCTONE.	65
FIGURA 52 - PORMENOR DA ROCHA ALTERADA, JÁ EM SAIBRO, ESTÁDIO DE ALTERAÇÃO W ₅₋₆ .	65
FIGURA 53 - PANORÂMICA DA ZONA 2. ENFASE PARA MAIS DE UM GRAU DE ALTERAÇÃO PRESENTE.	66
FIGURA 54 - PORMENOR DA COLORAÇÃO ROSA DO GRANITO, DEVIDO AOS PROCESSOS METASSOMÁTICOS.	66
FIGURA 55 - PORMENOR DE CAPA DE OXIDAÇÃO FÉRRICA NA PAREDE DE UMA DIÁCLASE.	66
FIGURA 56 - PORMENOR DA EVIDÊNCIA DE CREEPING, JUNTO DE UMA ZONA DE ESMAGAMENTO.	67
FIGURA 57 - PORMENOR DA PRESENÇA DE LÍQUENES NA ROCHA.	67
FIGURA 58 - VISTA PANORÂMICA DA ZONA 3.	68
FIGURA 59 - PAREDE JÁ ALTERADA, COM PRESENÇA DE VEGETAÇÃO E ESPAÇAMENTO ENTRE FRATURAS ELEVADO.	68
FIGURA 60 - PORMENOR DO PREENCHIMENTO DE UMA DIÁCLASE POR MUSGO.	69
FIGURA 61 - EVIDÊNCIA DA CONTINUIDADE DE UMA DIÁCLASE.	69
FIGURA 62 - PANORÂMICA DA ZONA 4.	70
FIGURA 63 - EVIDÊNCIAS DO AFLORAMENTO FRATURADO E DE ELEVADA CONTINUIDADE, COM DESTAQUE AINDA PARA A PRESENÇA DA VEGETAÇÃO.	70
FIGURA 64 - BLOCOS DE ASPETO ARREDONDADO. PRESENÇA DA VEGETAÇÃO.	70
FIGURA 65 - VISTA GERAL DA ZONA 5.1.	71
FIGURA 66 - PORMENOR DE BLOCO DE PEQUENAS DIMENSÕES ALTERADO E COM PRESENÇA DE VEGETAÇÃO ABUNDANTE.	71
FIGURA 67 - VISTA PANORÂMICA DA ZONA 5.2.	72
FIGURA 68 - VISTA PANORÂMICA DA ZONA 5.3.	72
FIGURA 69 - PORMENOR DE BLOCO COM DUALIDADE DE CORES DEVIDO AOS PROCESSOS METASSOMÁTICOS OCORRIDOS NA REGIÃO.	73
FIGURA 70 - VISTA PANORÂMICA DA ZONA 5.4.	73
FIGURA 71 - VISTA PANORÂMICA DA ZONA 5.5.	74
FIGURA 72 - DIFERENTES ESTÁDIOS DE ALTERAÇÃO NO AFLORAMENTO. PORMENOR DA CAPA DE OXIDAÇÃO.	74
FIGURA 73 - MARCAS DE ÁGUA REGISTRADAS NA ROCHA.	74

FIGURA 74 - PROCESSO DE CAULINIZAÇÃO.	75
FIGURA 75 - EVIDÊNCIAS DE PREENCHIMENTO POR MUSGO DAS DIÁCLASES.	75
FIGURA 76 - EVIDÊNCIAS DAS FRATURAÇÃO DO MACIÇO E DA SUA CONTINUIDADE. APLICAÇÃO DO MÉTODO SCANLINE.	76
FIGURA 77 - MAPA TOPOGRÁFICO COM A REPRESENTAÇÃO DAS ZONAS CARTOGRAFADAS. O CIRCULO VERDE INDICA O INICIO DA ZONA CARTOGRAFADA 1. A SETA PRETA INDICA A ORIENTAÇÃO DA ZONA 4 (ADAPTADO DO PDM DE ALMEIDA).	79
FIGURA 78 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 1. (16 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	88
FIGURA 79 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 1. (16 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	88
FIGURA 80 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 1. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (16 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	89
FIGURA 81 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 2. (57 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	89
FIGURA 82 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 2. (57 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	90
FIGURA 83 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 2. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (57 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	90
FIGURA 84 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 3. (28 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	91
FIGURA 85 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 3. (28 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	91
FIGURA 86 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 3. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (28 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	92
FIGURA 87 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 4. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	92
FIGURA 88 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 4. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	93
FIGURA 89 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 4. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	93
FIGURA 90 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 5.1. (6 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	94
FIGURA 91 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 5.1. (6 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	94
FIGURA 92 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 5.1. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (6 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	95
FIGURA 93 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 5.3. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PERCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	95

FIGURA 94 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 5.3. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	96
FIGURA 95 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 5.3. (18 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	96
FIGURA 96 - DIAGRAMA DE DENSIDADE DE POLOS DA ZONA 5.5. (78 DIÁCLASES REGISTRADAS. A ESCALA REPRESENTA PORCENTAGEM POR 1% DE ÁREA.).....	97
FIGURA 97 - DIAGRAMAS DE ROSETA DA VARIÁVEL DIREÇÃO DA ZONA 5.5. (78 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	97
FIGURA 98 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS REGISTOS DAS INCLINAÇÕES NA ZONA 5.3. LEITURA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E SENTIDO DESSA MESMA INCLINAÇÃO. (79 DIÁCLASES REGISTRADAS.)	98
FIGURA 99 - PLANOS MÉDIOS E POSSÍVEIS LINHAS DE INTERSEÇÃO PARA CADA ZONA CARTOGRAFADA.	99
FIGURA 100 - EVIDÊNCIA DOS PLANOS DOMINANTES NA ZONA 2 (A VERMELHO) E DO NÓ TECTÓNICO ENTRE A FALHA PRINCIPAL E A TERMAL (A PRETO) (FONTE: GOOGLE EARTH - 3/11/2017).	100

Índice de tabelas

TABELA 1 - TIPO DE DESCONTINUIDADES (VALLEJO ET AL., 2002).	7
TABELA 2 - SÍNTESE DOS PARÂMETROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO E DAS DESCONTINUIDADES.....	13
TABELA 3 - ESTADO DE ALTERAÇÃO DO MACIÇO (ISRM, 1981).	14
TABELA 4 - ESTADO DE FRATURAÇÃO DO MACIÇO (ISRM, 1981).	14
TABELA 5 - NOMENCLATURA PARA CARACTERIZAR OS GRAUS DE FRATURAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS (ISRM, 1981).....	16
TABELA 6 - DESCRIÇÃO DA CONTINUIDADE (PERSISTÊNCIA) DAS DESCONTINUIDADES (ISRM, 1981).	17
TABELA 7 - CLASSIFICAÇÃO E PERFIS DA RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES (ISRM, 1981).	18
TABELA 8 - TERMINOLOGIA DO GRAU DE ALTERAÇÃO DAS PAREDES (ISRM, 1981).	19
TABELA 9 - CARACTERIZAÇÃO DA ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES (ISRM, 1981).	20
TABELA 10 - AVALIAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM DESCONTINUIDADES (ISRM, 1978).	21
TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PELO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES (ISRM, 1978).....	24
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL E GEOCRONOLÓGICA DOS GRANITOIDES IBÉRICOS (ADAPTADO DE FERREIRA ET AL., 1987).	35
TABELA 13 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO CONSIDERADO.	80
TABELA 14 - ESTATÍSTICOS BÁSICOS DAS ZONAS CARTOGRAFADAS.	84
TABELA 15 - TESTES DE AJUSTAMENTO.	86
TABELA 16 - PONTOS DE INTERSEÇÃO ENTRE AS FAMÍLIAS DE CADA ZONA.	99

Índice de equações

(EQUAÇÃO 1).....	41
(EQUAÇÃO 2).....	41
(EQUAÇÃO 3).....	41
(EQUAÇÃO 4).....	41
(EQUAÇÃO 5).....	41
(EQUAÇÃO 6).....	41
(EQUAÇÃO 7).....	41
(EQUAÇÃO 8).....	42
(EQUAÇÃO 9).....	42
(EQUAÇÃO 10)	42
(EQUAÇÃO 11)	43
(EQUAÇÃO 12)	43
(EQUAÇÃO 13)	44
(EQUAÇÃO 14)	44
(EQUAÇÃO 15)	44
(EQUAÇÃO 16)	44
(EQUAÇÃO 17)	45
(EQUAÇÃO 18)	45
(EQUAÇÃO 19)	45
(EQUAÇÃO 20)	45
(EQUAÇÃO 21)	45
(EQUAÇÃO 22)	46
(EQUAÇÃO 23)	46
(EQUAÇÃO 24)	46
(EQUAÇÃO 25)	48
(EQUAÇÃO 26)	48
(EQUAÇÃO 27)	49
(EQUAÇÃO 28)	49
(EQUAÇÃO 29)	49
(EQUAÇÃO 30)	49
(EQUAÇÃO 31)	50
(EQUAÇÃO 32)	51
(EQUAÇÃO 33)	51
(EQUAÇÃO 34)	51
(EQUAÇÃO 35)	51
(EQUAÇÃO 36)	52
(EQUAÇÃO 37)	52

*“Dentro de nós há uma coisa que não tem nome,
essa coisa é o que somos.”
José Saramago*

Capítulo 1.

Introdução

1. Introdução

1.1. O papel da fraturação na definição de um modelo hidrogeológico conceptual

A presente dissertação insere-se no âmbito da unidade curricular “Dissertação” do 2º ano do Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde se pretende estudar a importância da fraturação na definição de um modelo hidrogeológico conceptual.

Esta dissertação versa sobre um trabalho cujo principal objetivo passa por estudar a fraturação regional e local de um maciço rochoso para ajudar na compreensão do modelo hidrogeológico de uma área termal, localizada no concelho de Almeida. A fraturação é responsável pela definição do escoamento regional e local, tendo por isso implicações importantes na organização da rede hidrográfica.

A análise geológico-estrutural assume um papel de relevância, uma vez que, na sua grande maioria, as ocorrências hidrotermais encontram-se associadas com circuitos profundos correlacionados com redes de fraturação megascópica, de fácil identificação graças à sua expressão morfológica. No entanto, a abordagem geológico-estrutural não deve ser restringida apenas pela análise da fraturação megascópica, uma vez que as ocorrências hidrotermais sofrem condicionamentos por ruturas menores e, por vezes, de difícil caracterização.

Para a concretização deste propósito, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Reconhecimento geológico e geomorfológico da região, tendo por base a cartografia e bibliografia existente;
- Estudo das características das discontinuidades e dos parâmetros característicos presentes nos taludes graníticos;
- Levantamento de superfícies de discontinuidades, na sua maioria diáclases, e respetivos parâmetros a elas associadas, nomeadamente, orientação, espaçamento, continuidade, rugosidade, abertura, preenchimento e percolação;
- Definição das famílias de fraturas com recurso ao *software Steronet*;
- Tratamento estatístico do parâmetro orientação, com recurso ao *software Oriana*, para tratamento de dados circulares;
- Definição de um zonamento geotécnico considerando as caracterizações efetuadas e dessa forma, contribuir para a melhoria do modelo hidrogeológico local.

De forma a alcançar os objetivos propostos, o trabalho foi desenvolvido, essencialmente, em três etapas:

- Numa primeira fase, efetuou-se a recolha exaustiva de informação bibliográfica de interesse específico e histórico da área em estudo;
- De seguida, efetuou-se o trabalho de campo, com a recolha de dados geológico-geotécnico;
- Por fim, e relativamente ao trabalho de gabinete, efetuou-se a análise, o processamento e a interpretação dos dados, de forma a atingir os objetivos referidos.

1.2. Estrutura

A presente dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos, que por sua vez se encontram divididos em subcapítulos. Assim, para além desta parte introdutória, segue-se um capítulo sobre a caracterização geológica e geotécnica dos maciços rochosos, onde se apresentam os parâmetros geológicos-geotécnicos das descontinuidades, bem como os métodos para a representação gráfica das mesmas. De seguida, é apresentado o enquadramento geológico e geomorfológico geral do Maciço Ibérico.

Segue-se um capítulo dedicado à estatística aplicada a dados direcionais ou circulares, onde são referidos métodos de estudo para os mesmos.

Posteriormente, surge o capítulo dedicado ao caso de estudo, onde é efetuada a sua caracterização geológica e geomorfológica.

De seguida, é abordado o tratamento dos dados recolhidos, discutindo-se as observações registadas no campo, bem como a análise e a aquisição dos dados direcionais.

Por fim, o último capítulo é reservado para as conclusões e possíveis considerações futuras.

1.3. Metodologias e técnicas

Para a elaboração da presente dissertação, foram realizadas campanhas de terreno no período de abril de 2017, com posterior compilação, uniformização e tratamento dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos recolhidos. Todas as campanhas tiveram a supervisão e coordenação da Prof. Doutora Renata Gomes (DEM|FEUP).

Os resultados obtidos e apresentados ao longo do caso de estudo correspondem a diversos afloramentos graníticos, onde o maciço rochoso se encontra exposto na nascente das águas termais de Fonte Santa, Almeida, distrito da Guarda. Os parâmetros obtidos dizem respeito ao levantamento *in situ* de cerca de 222 descontinuidades ao longo 7 estações e com recurso à técnica de amostragem linear aplicada nas faces expostas dos maciços rochosos.

Para um melhor levantamento das características das descontinuidades e dos maciços rochosos onde estas se encontram, foi elaborada uma ficha de registo uniformizada (Anexo 1), onde ficaram assinaladas todas as particularidades geológica-geotécnicas e geomecânicas consideradas pertinentes. A análise das famílias de fraturas foi efetuada com recurso ao *software StereoNet*.

O tratamento estatístico das descontinuidades foi efetuado com recurso ao *software Oriana*, através da elaboração de diagramas de roseta.

Capítulo 2.

Caracterização geológica e geotécnica dos maciços rochosos

2. Caracterização geológica e geotécnica dos maciços rochosos

2.1. Generalidades

A caracterização e o estudo do comportamento dos maciços rochosos são uma vertente de engenharia, designada de geotecnia. É sua função explicar a génese dos maciços terrosos e rochosos, descreve-los de forma qualitativa e quantitativamente de modo a analisar a sua estabilidade.

A geotecnia agrupa diversas disciplinas, sendo uma delas a mecânica das rochas. A mecânica das rochas encarrega-se do estudo teórico e prático das propriedades e comportamento mecânico dos materiais rochosos e da sua resposta perante ações de forças aplicadas no ambiente físico (Vallejo *et al.*, 2002). De forma mais simplificada, pode assumir-se que a mecânica das rochas tem como objetivo principal, conhecer e prever o comportamento dos maciços rochosos, levando em consideração os requerimentos - internos e externos - que sobre eles se exercem, com o intuito de encontrar soluções para a sua estabilidade.

Segundo Pereira (1985), de uma forma puramente teórica, um maciço rochoso começou por ser uma rocha que foi sujeitada a diversos campos de tensões ao longo da sua vida geológica. Considerando as condições ambientais a que se encontra sujeito, nomeadamente, pressão, temperatura e campo de tensões, bem como as características inerentes do material - resistência, deformabilidade - esse maciço rochoso acabará por, inevitavelmente, sofrer modificações, das quais o aparecimento das descontinuidades pode ser estimado como uma das mais importantes.

A composição de um maciço rochoso assenta essencialmente em duas componentes, a matriz rochosa e as descontinuidades. As descontinuidades separam os blocos, atuando como superfícies de fraqueza, pelo que, desta forma, regulam os processos de deformação e rotura dos maciços.

Torna-se importante efetuar uma distinção entre maciço rochoso propriamente dito e matriz rochosa. No que diz respeito ao maciço rochoso, é tido como o conjunto dos blocos da matriz rochosa e das descontinuidades dos diversos tipos que afetam o meio rochoso; em termos mecânicos, estes apresentam-se como meios descontínuos, anisotrópicos e heterógenos. A matriz rochosa é todo o material rochoso isento de descontinuidades, ou os blocos de rocha intacta que ficam entre as descontinuidades; apesar de se considerar como continua, apresenta um comportamento heterogéneo e anisotrópico (Vallejo *et al.*, 2002).

Para uma correta caracterização geotécnica, é determinante um adequado levantamento geotécnico, conhecendo o comportamento e as propriedades que possam ter influência nos maciços rochosos, dos quais se destacam as condições hidrogeológicas, o grau de alteração, a presença de descontinuidades, a estrutura geológica, entre outros (Monteiro, 2008).

Numa fase inicial, deve-se proceder à pesquisa e recolha de toda a informação existente que diga respeito à área em estudo, entre os quais, elementos topográficos, geológicos, sismológicos e geotécnicos. Sempre que possível, e tendo em consideração a área em estudo, deve-se recorrer à bibliografia regional, ao estudo de mapas topográficos e geológicos,

fotografias aéreas e/ou imagens de satélite e, caso se encontrem disponíveis, relatórios geológicos e geotécnicos anteriores.

Após a recolha desta informação e posterior tratamento da mesma, é obtida uma síntese topográfica e geológica básica, onde o resultado final é um reconhecimento geológico-geotécnico através da cartografia de base (Monteiro, 2008).

Depois, é o momento para efetuar o reconhecimento de campo. Este deve abranger, sempre que possível, uma área maior do que a diretamente relacionada com o estudo, para que se possa conseguir uma correta caracterização geológica local/regional. O objetivo do reconhecimento de campo é, na sua grande maioria, a construção da cartografia geológica apropriada à dimensão e tipo do estudo. Se possível, e sempre que hajam dados disponíveis, as informações relativas às particularidades hidrogeológicas dos maciços, características geomorfológicas e morfotectónicas, bem como a atividade sísmica registada na região, devem ser incluídas no processo de reconhecimento geológico (Monteiro, 2008).

Esta etapa é fundamental para se compreender o desenvolvimento das unidades e estruturas geológicas que se sucederam no local alvo de estudo.

2.2. Descontinuidades

A designação de descontinuidade engloba todo e qualquer plano de origem mecânica, sedimentar ou tectónica que separa ou torna independente os blocos de matriz rochosa de um maciço rochoso (Vallejo *et al.*, 2002).

As superfícies de descontinuidade criam planos de fragilidade nos maciços rochosos que regulam, na maioria dos casos, o comportamento mecânico dos mesmos, influenciando a resistência, zonas de rotura, deformabilidade, permeabilidade e comportamento hidráulico. Este comportamento mecânico é ainda subordinado pela natureza, orientação e frequência dos planos de descontinuidade.

As descontinuidades são mais suscetíveis de sofrerem meteorização, pelo que se assumem como canais preferenciais para que ocorra a circulação de água.

Estas podem ser de diversas géneses e tipos - superfícies de estratificação, juntas, falhas, diáclases, diques, entre outras.

Entender os processos que originaram os diversos tipos de descontinuidades é um tema extremamente complexo, dado que se torna difícil de definir um modelo que possibilite compreender, na sua totalidade, todos os diferentes campos de tensões e posteriores estados de deformação e possível rotura, que levam à formação das descontinuidades.

As descontinuidades podem ser categorizadas em diferentes tipos, pelo que podem ser divididas em sistemáticas, caso se encontrem agrupadas em famílias, e em singulares, caso apareçam num único plano que atravessa o maciço rochoso. As descontinuidades singulares são caracterizadas por serem mais contínuas e persistentes; já as descontinuidades sistemáticas, são caracterizadas pela sua orientação média (Monteiro, 2008).

O termo descontinuidade é relacionado com qualquer plano de separação no maciço rochoso, podendo ter origem sedimentar ou tectónico. Na tabela 1 encontram-se agrupados os diferentes tipos de descontinuidades. Para o estudo das descontinuidades verificadas no maciço em estudo, torna-se importante definir alguns conceitos, nomeadamente no que diz respeito às descontinuidades planares.

Tabela 1 - Tipo de discontinuidades (Vallejo et al., 2002).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	- Planos de estratificação	- Falhas
	- Planos de laminação	- Filões
	- Diáclases ou juntas	- Discordâncias
	- Planos de xistosidade	
Lineares	- Interseção de discontinuidades planares	- Eixos de dobra
	- Lineações	

a) Falha

Segundo Bell (1993), as falhas são consideradas fraturas nos estratos da crosta, ao longo dos quais, a rocha adjacente foi deslocada. São caracterizadas por serem epigenéticas e por estarem associadas a uma elevada continuidade no maciço (Pereira, 1985). A quantidade de deslocamento sofrido pode variar entre apenas alguns milímetros até dezenas de quilómetros, sendo que, em muitas falhas, a fratura é uma ocorrência única, mas em outros casos, o deslocamento encontra-se associado a toda uma zona de falha.

Como qualquer outro plano em geologia estrutural, a orientação de um plano de falha é definida em termos de direcção e inclinação.

Para que uma falha seja caracterizada corretamente, torna-se importante estabelecer alguns conceitos - Figura 1.

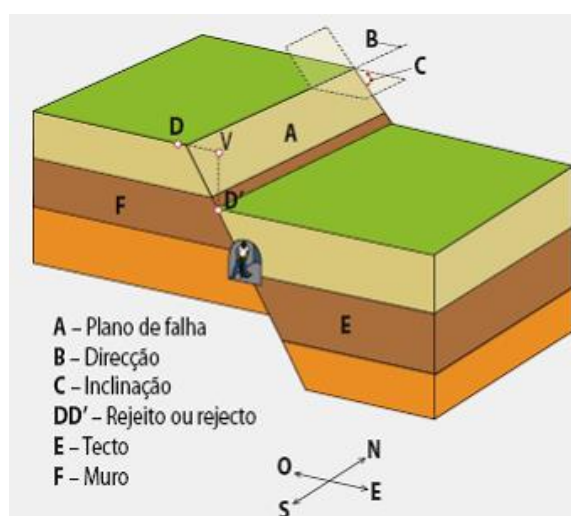


Figura 1 - Principais características que permitem descrever uma falha (Matias et al., 2004).

A superfície de separação das partes do maciço rochoso é, geralmente, designada por superfície ou plano de falha, pelo que o espaço entendido entre as áreas é designado de caixa de falha.

O muro de uma falha diz respeito à superfície de massa rochosa superior, ao longo da qual ocorreu o deslocamento; relativamente ao tecto, diz respeito à massa rochosa inferior. Graças ao deslocamento que deu origem à falha, dois pontos outrora adjacentes ficaram, consequentemente, afastados. Esse afastamento é designado por rejeito ou rejeto de falha; ao longo da literatura consultada, é frequente o uso dos nomes rejeito horizontal e rejeito vertical,

sendo considerada a distância que separa dois pontos homólogos na horizontal e na vertical, respectivamente.

De forma a se reconhecer uma falha no terreno, são usados critérios que ajudam a perceber a existência ou não da mesma. Alguns dos critérios mais importantes passam pelo deslocamento de estratos-chave, truncamento de estruturas e estratos, repetição e/ou omissão de estratos; evidências de mineralizações e silicificação, presenças de escarpas de falha, alinhamento da vegetação e retilinearidade de um rio, ou presença de meandros anômalos.

O estudo e as investigações das falhas podem ser efetuados em afloramentos, abertura de estradas, minas ou até outras escavações, onde poderá ser possível a observação direta de falhas menores.

Por outro lado, falhas de maiores dimensões podem ser reconhecidas pelas evidências estratigráficas e fisiográficas, através da fotografia aérea, dado que apenas pequenos segmentos da falha podem estar expostos no campo, podendo esta estar amplamente coberta sob solo, detritos e/ou vegetação. Geralmente, as falhas tendem a ocorrer em conjuntos de descontinuidades paralelas ou sub-paralelas, dando origem a famílias, ao longo das quais fica registado o movimento de maior ou menor extensão.

As falhas e as zonas de cisalhamento, do ponto de vista hidrogeológico, são zonas de elevado interesse, dado que podem afetar o regime de circulação da água subterrânea de variadas formas, nomeadamente (Shinghal & Gupta, 2010):

- As falhas podem estar na origem do truncamento, deslocamento, repetição ou inclusive omissão de cursos de água;
- Através da existência de uma falha, rochas impermeáveis podem ser movimentadas contra um aquífero, afetando o fluxo e a distribuição de água subterrânea;
- Um aquífero pode ser reexposto na superfície, para recarga, através de falhas do tipo inversa;
- Diques verticais e filões, geralmente, atuam como barreiras à circulação da água subterrânea, sendo, no entanto, possível, serem quebrados por falhas, levando à criação de canais locais;
- Através das falhas é possível serem criadas zonas lineares de porosidade secundária elevada, podendo atuar como canais preferenciais da circulação do fluxo, levando à carga/descarga do aquífero.

b) Diáclases

As diáclases, fraturas, ou juntas, têm na sua origem processos complexos envolvendo a história geológica da área. Fraturas, que derivam do latim *fratus*, que significa “partido”, são superfícies ao longo das quais rochas ou minerais se encontram partidas; são superfícies ao longo das quais o material rochoso perdeu coesão (Twiss & Moores, 1992).

As diáclases ocorrem em todos os tipos de rocha e são planos ao longo dos quais as tensões causaram perda parcial da coesão da rocha, estando assim representado os planos de fraqueza na rocha, sem existência de movimento visível paralelo à superfície da mesma. Geralmente, a maior movimentação diz respeito ao afastamento dos compartimentos na direção perpendicular ao plano de fratura. Quando se verifica o movimento dos planos paralelo à superfície da fratura, são usados os termos falha e cisalhamento. O termo “corte” é usado quando ocorre uma fratura em pequena escala, e que pode originar uma falha. Quando se verifica uma fratura tensional

extensa aberta é designada de fissura; caso a fissura se encontre preenchida, ganha o nome de filão.

Na prática, a distinção precisa entre diáclase e falha pode ser complicada de se efetuar. Por vezes, dentro de um conjunto de diáclases, alguns planos podem mostrar evidências de deslocamentos, enquanto outros, podem não exibir sinais de qualquer movimento. Uma diáclase aberta poderá ter sido originada por um pequeno movimento perpendicular à superfície, pelo que esta pode ser preenchida por minerais secundários ou fragmentos de rochas, ou pode conservar-se não preenchida.

Como se poderá ver mais à frente, as diáclases podem ser caracterizadas da seguinte forma:

- Extensão;
- Forma da superfície de fratura - plana, curvilínea ou irregular;
- Atitude;
- Frequência - número de diáclases sub-paralelas;
- Espaçamento - distância entre duas diáclases consecutivas;
- Aspeto da superfície de fratura - lisa, rugosa ou granular;
- Enchimento - possível preenchimento e em caso afirmativo quais os materiais que as preenchem.

Conforme a forma da superfície da fratura, as diáclases podem ser categorizadas da seguinte forma: se possuírem superfícies planas, são designadas diáclases sistemáticas - Figura 2. Estas diáclases apresentam uma orientação sub-paralela e um espaçamento regular.

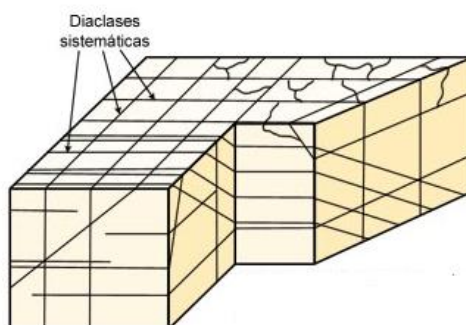


Figura 2 - Representação de diáclases sistemáticas num bloco diagrama (adaptado de Loczy e Ladeira, 1980).

No caso de as diáclases que se encontrem numa mesma área e que possuam uma orientação semelhante, formar uma família de diáclases - Figura 3.

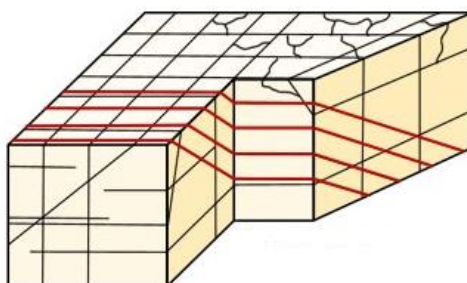


Figura 3 - Representação de um sistema de diáclases num bloco-diagrama (a vermelho) (adaptado de Loczy e Ladeira, 1980).

As diversas famílias de diáclases que possam existir numa determinada zona, constituem um sistema de diáclases - Figura 4. Na eventualidade de duas famílias de diáclases apresentarem orientações sensivelmente normais entre si, são consideradas ortogonais.

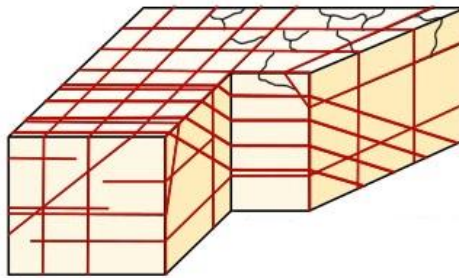


Figura 4 - Representação de uma família de diaclases num bloco-diagrama (a vermelho) (adaptado de Loczy e Ladeira, 1980).

Para o caso de diaclases que possuem superfícies curvas ou irregulares, estas são designadas de diaclases não-sistemáticas - Figura 5.

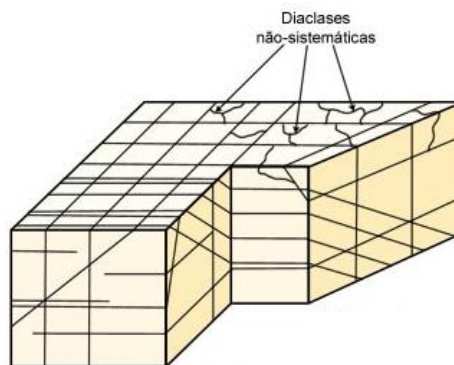


Figura 5 - Representação de diaclases não-sistemáticas num bloco-diagrama (adaptado de Loczy e Ladeira, 1980)

As zonas de diaclases podem ser muito extensas, com comprimentos de diversos quilómetros, podendo o comportamento hidráulico variar quer lateralmente, quer verticalmente.

Em qualquer afloramento, as diaclases apresentam vestígios dos seus comprimentos e espaçamentos entre as mesmas. As diaclases podem formar redes de fraturação contínuas e interligadas, desde que os comprimentos nos diferentes conjuntos sejam muito maiores que o espaçamento entre as mesmas. A interligação nas redes de fraturação leva a uma melhor conectividade hidráulica.

No caso de uma diaclase individual, esta apresenta uma extensão espacial limitada, sendo descontínua no seu próprio espaço - Figura 6.

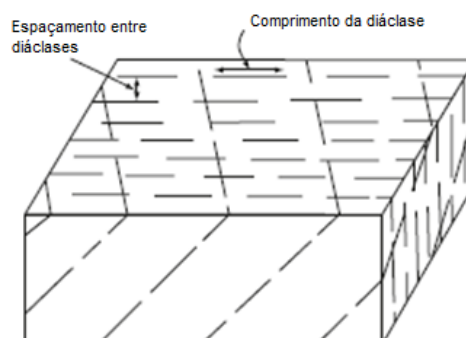


Figura 6 - Dois conjuntos de fraturas são apresentadas de forma sistemática no bloco (Singhal & Gupta, 2010).

Por vezes, estas atravessam planos de estratificação, clivagem e xistosidade, e encontram-se, de uma forma geral associadas a diferentes tipos de tensões, resultantes de diversos fenómenos, nomeadamente (Singhal & Gupta, 2010):

- Tensões tectónicas, relacionadas com a deformação da rocha;
- Tensões residuais com origem em eventos geológicos que ocorreram muito antes da fraturação propriamente dita;
- Contração do material rochoso graças ao arrefecimento do magma ou dissecação dos sedimentos;
- Movimentos superficiais tais como, movimento de glaciares ou deslizamento de terras;
- Intempérie, que pode causar dilatação das rochas dando origem a rachaduras de extensão irregular, e pode ainda causa a dissolução, originando o alargamento das cavidades.

A densidade de fraturação e a sua orientação podem sofrer variações com a forma, estrutura interna e com a proximidade dos limites de corpos intrusivos, sendo que o diaclasamento é mais intenso perto das margens destes.

Relativamente às rochas ígneas, é bastante comum que se formem diáclases sub-paralelas à superfície topográfica - disjunção em laje. É frequente associar-se estas estruturas, designadas por fraturas de descamação, a fenómenos de descompressão sofridos pelas rochas quando são removidos os materiais que as recobrem, por processos de erosão. Estas encontram-se, por vezes, preenchidas por minerais que resultam da cristalização tardia de magma ricos em voláteis, ou por resultado da circulação de fluídos hidrotermais - Figura 7. Assim, formam-se filões e veios de rochas pegmatíticas, aplíticas ou de quartzo.

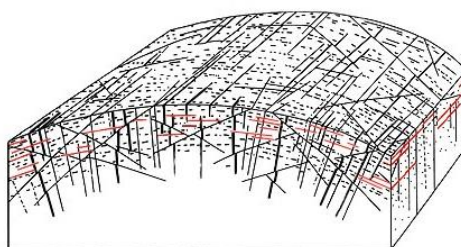


Figura 7 - Diagrama de fraturas num batólito granítico. A parte superior corresponde à superfície de erosão. As linhas a tracejado dizem respeito a diáclases formadas paralelamente à direção do fluxo magmático. As linhas a vermelho representam fraturas de descamação. As diáclases subverticais, criadas pelo arqueamento regional da crosta, encontram-se, muito provavelmente, relacionadas com a intrusão do granito. Nas periferias do batólito, há falhas de dimensões reduzidas que descolam diáclases pré-existentes (adaptado de Closs, 1931 in Hatcher, 1995).

É importante efetuar uma minuciosa caracterização dos parâmetros das diáclases, dado que estes influenciam o comportamento mecânico do maciço rochoso. No caso de maciços graníticos, que possuem permeabilidade baixa, é através da existência de diáclases que proporciona a penetrabilidade da rocha pelos fluídos, ajudando para o aumento de reservas de água subterrânea, contribuindo ao mesmo tempo para a alteração da rocha. O estudo sistemático das diáclases, nomeadamente das suas orientações, é importante uma vez que prevê informações sobre a natureza e a orientação do campo de tensões que levou à deformação.

c) Planos de estratificação

As discontinuidades paralelas à superfície de deposição dos sedimentos, que formam confinamentos nos estratos nas rochas sedimentares, são denominados de planos de estratificação e podem ser facilmente identificados no terreno graças à composição textural e mineralógica das camadas. Podem separar estratos de igual ou diferente litologia, mas com graus diferentes de compactidade e cimentação, bem como camadas macroscopicamente iguais. Os planos de estratificação conferem anisotropia e possuem uma profunda influência no fluxo de água subterrânea na zona vadosa - Figura 8 (Rodrigues, 2013).

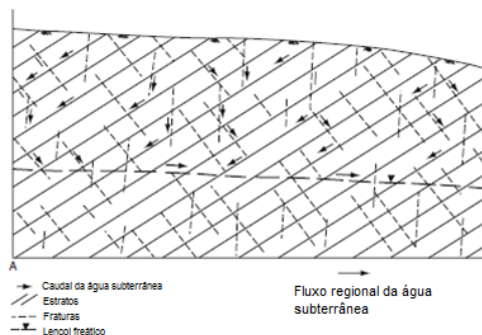


Figura 8 - Diagrama esquemático mostrando o papel dos planos de estratificação e fraturas na movimentação de água subterrânea na zona vadosa (Singhal & Gupta, 2010).

d) Planos de laminação

Os planos de laminação caracterizam-se pela orientação paralela dos minerais lamelares ou bandas minerais nas rochas sedimentares, restringindo os níveis de espessura inferior num seguimento sedimentar, que podem variar desde o milímetro ao centímetro (Rodrigues, 2013).

e) Planos de xistosidade

Os planos de xistosidade, possuem origem tectónica, e encontram-se associados a rochas que sofreram grandes deformações. De forma geral, ocorrem em elevado número, relacionados em famílias, de orientação e génese similar, sucedendo-se de forma perpendicular à direção compressiva principal que os originou. São considerados como discontinuidades sistemáticas que possuem um maior desenvolvimento quanto menor for a dimensão do grão da rocha que sofreu a deformação (Rodrigues, 2013).

2.3. Parâmetros de classificação de maciços rochosos

Considerando as necessidades de serem conhecidas as características e os comportamentos dos maciços rochosos, surgiu a necessidade de se criar classificações geomecânicas. Estas classificações têm por base índices de qualidade, onde é possível efetuar avaliações do maciço. A avaliação é feita recorrendo-se a métodos empíricos, de valores de deformabilidade e resistência do mesmo. A classificação dos maciços rochosos tem por objetivo coletar informação sobre o material rochoso, bem como características das discontinuidades, e ainda a geometria esperada para a escavação (caso se verifique), de forma a que se obtenham valores que auxiliem na tomada de decisões (Priest, 1993).

Para que se possa efetuar essas mesmas classificações geomecânicas, é necessário definir quais os parâmetros a serem usados; Bieniawski (1989) considera que os parâmetros devem ser recolhidos através de observações e ensaios simplificados de forma a que sua interpretação seja rápida, evidente e utilizável por qualquer pessoa, tendo sempre em vista a relevância para caracterização do maciço (Fontinhas, 2012).

Assim, encontram-se reunidos os parâmetros geológicos-geotécnicos na tabela 2, normalmente usados para se efetuarem reconhecimentos, descrições e caracterizações das descontinuidades para o estudo do comportamento mecânico e hidráulica do maciço rochoso.

Tabela 2 - Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos de caracterização do maciço e das descontinuidades.

Parâmetros geológico-geotécnicos (BGD)	Descrição
Grau de alteração	Nível de alteração do material da rocha
Grau de fraturação	Distância média medida entre descontinuidades.
Atitude geológica (direção/inclinação)	Orientação espacial, em termos da sua direção e inclinação, das estruturas planares (descontinuidades).
Espaçamento	Distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes que pertençam à mesma família.
Continuidade ou persistência	Comprimento do traço da descontinuidade.
Rugosidade	Aspereza na superfície de descontinuidades.
Resistência da parede das descontinuidades	Resistência à compressão uniaxial nas superfícies das descontinuidades.
Abertura	Distância da separação entre blocos que formam a descontinuidade, medida na perpendicular ao plano de descontinuidade.
Preenchimento	Material que preenche a abertura das descontinuidades.
Percolação ou infiltração	Fluxo de água nas paredes das descontinuidades.

a) Grau de alteração

Para se efetuar uma primeira avaliação da qualidade do maciço é comum recorrer-se ao seu grau de alteração. De forma a que qualquer pessoa seja capaz de compreender o estado de alteração do maciço, é utilizada a classificação efetuada pela Sociedade Internacional de Mecânica da Rochas - Tabela 3 - onde se consideram cinco graus de alteração (ISRM, 1981).

Tabela 3 - Estado de alteração do maciço (ISRM, 1981).

Símbolo	Designação	Características
W ₁	Sã	A rocha não apresenta quaisquer sinais de alteração.
W ₂	Pouco alterada	Sinais de alteração apenas nos planos e bordos das descontinuidades.
W ₃	Medianamente alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso (mudança de cor) mas a rocha não é friável (não se desagrega em contacto com a água).
W ₄	Muito alterada	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável.
W ₅	Decomposta	O maciço apresenta-se completamente friável (comportamento de solo).

b) Grau de fraturação

Por grau de fraturação entenda-se a distância média entre sucessivas descontinuidades medida segundo a interseção com a linha de amostragem - *scanline* (ISRM, 1981).

Importa realçar que o grau de fraturação não prevê uma estimativa do espaçamento entre as descontinuidades da mesma família, mas sim, relativamente ao espaçamento entre todas as descontinuidades cartografadas, sempre que possível através de uma linha de amostragem (ISRM, 1981).

Sempre que for exequível, e independentemente do número de famílias consideradas, o grau de fraturação deverá ser estimado de forma global e ainda, se possível, o espaçamento entre cada família.

Por frequência média das descontinuidades, entenda-se a média do número de descontinuidades cartografadas por unidade de comprimento, ao longo de uma linha de amostragem. Pode-se afirmar que a frequência média pode ser considerada como uma medida do grau de fraturação da rocha ao longo da *scanline* (Martins, 2011).

Na tabela 4, encontra-se a classificação estabelecida pela ISRM (1981).

Tabela 4 - Estado de fraturação do maciço (ISRM, 1981).

Classe	Afastamento das fraturas	Fraturação do maciço	Afastamento (cm)
F ₁	Muito afastadas	Muito pouco fraturado	>200
F ₂	Afastadas	Pouco fraturado	60-200
F ₃	Mediamente afastadas	Mediamente fraturado	20-60
F ₄	Próximas	Muito fraturado	6-20
F ₅	Muito próximas	Fragmentado	<6

c) Atitude geológica

A atitude geológica, ou também designada orientação espacial, é definida por dois parâmetros, figura 9:

- Direção - ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético;
- Inclinação - ângulo que a reta de maior declive da descontinuidade define com o plano horizontal.

A identificação destes dois parâmetros possibilita a identificação das famílias de descontinuidades ou, se for caso disso, descontinuidades singulares.

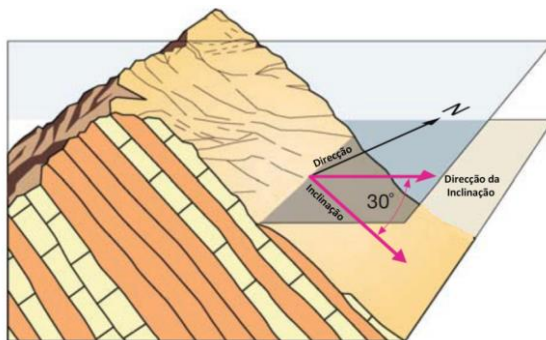


Figura 9 - Atitude de uma descontinuidade (adaptado de Scesi & Gattioni, 2009)

Cartografia de superfície e subterrânea, furos de sondagem e amostras orientadas são as fontes de obtenção de informação sobre a orientação das descontinuidades; a informação recolhida tem que ser combinada num sistema que possibilite a respetiva análise, sendo esta simplificada pela utilização de métodos simples e precisos que exprimem a orientação das descontinuidades.

Uma vez no campo, é aconselhável medir um considerável número de orientações para que se possa definir corretamente cada família. O número de medições depende da dimensão da zona estudada, da aleatoriedade das orientações dos planos e do detalhe da análise.

Relativamente ao tratamento da representação gráfica das orientações das diferentes famílias, esta pode ser efetuada de diversas formas, tendo em consideração a dualidade de critérios existentes consoante o tipo de descontinuidades. Algumas descontinuidades, pelo seu elevado interesse, são representadas individualmente, como é o caso das falhas e dos filões.

Caso as descontinuidades ocorram em elevado número, de tal forma que dão origem à compartimentação do maciço rochoso, fica impossível efetuar a sua representação; assim, é comum recorrer-se à análise estatística das suas particularidades, dando particular atenção às atitudes medidas, com o objetivo de se obter uma imagem do tipo de compartimentação. Nestes casos, torna-se comum fazer-se acompanhar a planta geológica com algumas atitudes representativas e um esquema gráfico elucidativo do tratamento efetuado ao conjunto de medições; é também importante desenvolver um relatório que identifica as propriedades físicas de cada família de descontinuidades. É imprescindível definir, antes de se inaugurar o registo das orientações, zonas do maciço que revelem características próprias, relativamente à atitude das descontinuidades; apenas depois é aconselhável efetuar o tratamento estatístico.

d) Espaçamento

O espaçamento pode ser definido como sendo a distância perpendicular média entre os planos de descontinuidades da mesma família (Vallejo *et al.*, 2002).

Este parâmetro é medido através de uma fita métrica ao longo de um comprimento satisfatoriamente representativo da frequência das descontinuidades, tendo por objetivo a determinação da dimensão dos blocos onde o talude se encontra compartimentado. Este parâmetro encontra-se intrinsecamente relacionado com a estabilidade do mesmo, dado que as forças atuantes na instabilização dos blocos, encontram-se dependentes dos seus volumes (Giani, 1992). Geralmente, o valor considerado é referente ao espaçamento médio ou modal dos valores medidos para uma mesma família de descontinuidades - Figura 10. Influencia de forma global, o comportamento do maciço rochoso, definindo o tamanho dos blocos de matriz rochosa que dão origem a diferentes famílias. Maciços rochosos onde se verifiquem espaçamentos entre descontinuidades de vários metros, irão prevalecer as propriedades da matriz rochosa ou dos planos de descontinuidade, considerando a situação de trabalho a ser executada, ao longo dos processos de deformação e rotura; no caso de espaçamentos menores, até 1 ou 2 metros, o comportamento do maciço será determinado pelos planos de fraqueza; caso o espaçamento seja ainda menor, implica que o maciço se encontra muito fraturado, apresentando um comportamento “isotrópico”.

A determinação do espaçamento entre descontinuidades de uma mesma família deve ser efetuada de acordo com a proposta da figura 10 e usando a sua terminologia proposta pela ISRM (1981) para que uma correta caracterização - Tabela 5. Esta tabela é em tudo semelhante à tabela 4 de classificação do grau de fraturação, dado que estes dois parâmetros se encontram intimamente ligados.

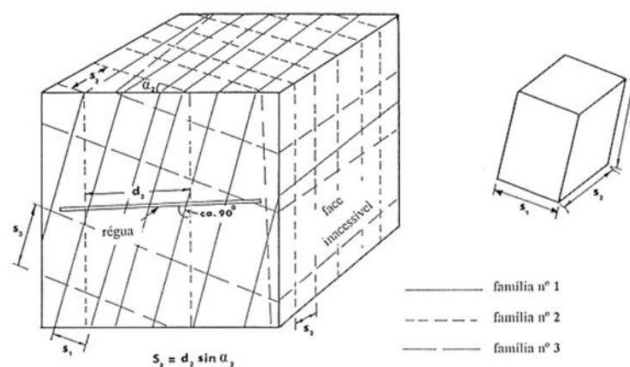


Figura 10 - Obtenção do espaçamento entre descontinuidades a partir de uma face exposta de um maciço rochoso (ISRM, 1978).

Tabela 5 - Nomenclatura para caracterizar os graus de fraturação de maciços rochosos (ISRM, 1981).

Intervalos (cm)	Nomenclatura	Designação
> 200	F ₁	Muito afastadas
60 - 200	F ₂	Afastadas
20 - 60	F ₃	Medianamente afastadas
6 - 20	F ₄	Próximas
< 6	F ₅	Muito próximas

O espaçamento entre descontinuidades tem ainda um papel importante no que diz respeito à permeabilidade do maciço rochoso. De uma forma geral, a condutividade hidráulica de uma determinada família é inversamente proporcional ao seu espaçamento, sempre que a abertura das descontinuidades individuais seja comparável (Pereira, 2007).

Quando nos maciços rochosos se caminha em profundidade, verifica-se um aumento da pressão existente, sendo, portanto, comum existir um aumento do espaçamento das diáclases, não favorecendo a condutividade hidráulica. O espaçamento à superfície resulta da descompressão a que os maciços normalmente se encontram sujeitos, próximo da mesma, como consequência da sua meteorização e da erosão. Desta forma, compreende-se que descontinuidades próximas favorecem a condutividade hidráulica.

e) Continuidade ou persistência

A continuidade ou persistência é definida como sendo a extensão de um plano de descontinuidade (Singhal & Gupta, 2010).

A continuidade encontra-se intrinsecamente relacionada com o grau de fracturação, tratando-se de uma medida bruta do comprimento da penetração de uma fratura num maciço rochoso. É o parâmetro que mais influência apresenta no comportamento mecânico e hidráulico do maciço rochoso; considerando que algumas descontinuidades se apresentam mais persistentes e contínuas do que outras, torna-se num parâmetro bastante importante no controlo do fluxo de água subterrânea. Apesar da sua elevada importância, a continuidade é um parâmetro de difícil quantificação através da observação de afloramentos, dado que o traço dos planos de fratura segue um mergulho aparente. A continuidade é medida através de uma fita métrica, onde são retirados os valores do comprimento do traço, ao longo da superfície das descontinuidades, nas zonas expostas (Pereira, 2007). É usada a classificação sugerida pela ISRM (1981), tabela 6.

Tabela 6 - Descrição da continuidade (persistência) das descontinuidades (ISRM, 1981).

Persistência	Extensão (m)
Continuidade muito baixa	< 1
Continuidade baixa	1 - 3
Continuidade média	3 - 10
Continuidade elevada	10 - 20
Continuidade muito elevada	> 20

As descontinuidades mais extensas devem ser objeto de um estudo pormenorizado, uma vez que são estas que determinam os principais planos de rotura do maciço rochoso (Vallejo *et al.*, 2002).

f) Rugosidade

A rugosidade de um plano de descontinuidade representa um índice da irregularidade e ondulação que existam nas superfícies das mesmas, referindo-se ao plano de descontinuidade média (Giani, 1992).

A resistência ao deslizamento de um plano de descontinuidade é influenciada em grande medida pelo parâmetro da rugosidade da sua parede, principalmente em casos de paredes não deslocadas e não preenchidas. Isto acontece porque a rugosidade aumenta a resistência ao corte, logo a sua influência na resistência ao corte das descontinuidades reduz conforme o aumento da abertura (esteja preenchida ou não) ou com eventos de deslocamento anteriores (ISRM, 1981).

A rugosidade das paredes das descontinuidades pode ser medida no campo com recurso a diversos métodos, dependendo da exatidão requerida, da escala de medida ou da acessibilidade ao afloramento. O método mais utilizado e de maior facilidade em termos de utilização passa pela comparação visual das descontinuidades com os perfis *standard* de rugosidade - Tabela 7.

De forma qualitativa, um plano de descontinuidade pode ser, liso-ondulado, rugoso-planar ou rugoso-ondulado, por exemplo. Relativamente a uma classificação quantitativa, esta tem o objetivo de providenciar informações numéricas que se revelem úteis para a previsão da resistência ao deslizamento de uma descontinuidade, podendo o plano de descontinuidade ser classificado de acordo com a nomenclatura $R_{[1; 5]}$ (Giani, 1992).

Tabela 7 - Classificação e perfis da rugosidade das descontinuidades (ISRM, 1981).

Forma do perfil	Classe	Descrição	Nomenclatura	Perfil típico
Denteada	I	Rugosa	R_{1-2} Pouco rugosa	
	II	Lisa		
	III	Estriada		
Ondulada	IV	Rugosa	R_3 Medianamente rugosa	
	V	Lisa		
	VI	Estriada		
Plana	VII	Rugosa	R_{4-5} Muito rugosa	
	VIII	Lisa		
	IX	Estriada		

g) Resistência das paredes das descontinuidades

As particularidades das paredes dos blocos onde se encontram inseridas descontinuidades não devem ser descuradas, dado que condicionam a resistência e a condutividade hidráulica do maciço rochoso. A resistência das paredes das descontinuidades é definida pela ISRM (1978) como sendo equivalente à resistência de compressão da parede da rocha adjacente de uma descontinuidade, sendo por isso um fator muito importante da resistência ao corte e deformabilidade, particularmente se as descontinuidades não se encontrarem preenchidas.

Assim, para a obtenção da resistência das paredes das descontinuidades recorre-se a correlações com outras propriedades. É comum averiguar o grau de alteração através da dureza definida com o martelo de Schmidt - esclerómetro portátil, figura 11, ou mesmo através da resposta com o martelo de geólogo.



Figura 11 - Esclerômetro portátil.

Geralmente, as rochas que se encontram expostas à superfície apresentam-se meteorizadas, sendo que este processo afeta, maioritariamente as paredes das discontinuidades. Consequentemente, é importante analisar quer o grau de alteração do maciço rochoso, como já visto anteriormente, quer o material que forma a parede. Na tabela 8, encontram-se os termos para relatar o grau de alteração do material rochoso das paredes.

Tabela 8 - Terminologia do grau de alteração das paredes (ISRM, 1981).

Termo	Descrição
Fresca	Não são observadas quaisquer evidências de meteorização na matriz rochosa.
Descolorada	São visíveis mudanças de cor na matriz rochosa.
Deteriorada	Os grãos minerais não se encontram alterados, mas a rocha é friável.
Decomposta	A maior parte dos minerais estão alterados, sendo difícil conhecer a composição original da rocha.

h) Abertura

A abertura pode ser definida como sendo a distância perpendicular que separa as paredes de rocha adjacentes de uma discontinuidade aberta, onde o espaço interposto é preenchido por ar ou água (ISRM, 1981). As discontinuidades que outrora foram preenchidas, também podem ser avaliadas quanto à abertura, mas apenas se o material de enchimento tiver sido lavado localmente - Figura 12. Este parâmetro varia conforme as diferentes zonas do maciço rochoso - uma discontinuidade pode, à superfície, apresentar uma abertura de diversos centímetros; mas em profundidade, a mesma discontinuidade pode estar completamente fechada. Isto ocorre muito graças à descompressão dos próprios maciços, à meteorização sofrida, aos deslocamentos de discontinuidades, ou aos fenómenos de dissolução (Pereira, 2007).

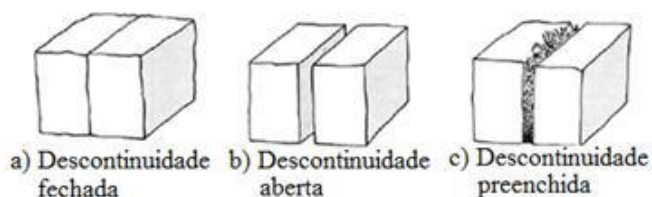


Figura 12 - Definição de abertura das discontinuidades (ISRM, 1978).

A influência da abertura na resistência ao corte da descontinuidade é importante, incluindo nas descontinuidades fechadas, uma vez que modificam as tensões efetivas que atuam sobre as paredes (Pereira, 2007).

A descrição da abertura é efetuada segundo uma terminologia proposta pela ISRM (1981), exibida na tabela 9, onde cada família de descontinuidades deve ser analisada de forma individualizada e qualificada pelos valores médios mais representativos de cada uma delas; a medição é efetuada com uma fita métrica.

Tabela 9 - caracterização da abertura das descontinuidades (ISRM, 1981).

Abertura (mm)	Descrição	Classificação
< 0,1	Muito apertada	Descontinuidade fechada
0,1 - 0,25	Apertada	
0,25 - 0,5	Parcialmente aberta	
0,5 - 2,5	Aberta	Descontinuidades entreabertas
2,5 - 10	Medianamente larga	
> 10	Larga	
10 - 100	Extremamente larga	
100 - 1000	Extremamente larga	Descontinuidades abertas
> 1000	Cavernosa	

i) Preenchimento

O preenchimento é o termo usado para o material que separa as paredes de rocha adjacente das descontinuidades (ISRM, 1978). De uma forma geral, pode-se afirmar que o material de preenchimento é composto essencialmente por solos - argilosos, arenosos e siltsos - independentemente do seu grau de consolidação e/ou cimentação; no entanto, é bastante comum também poder encontrar-se minerais, como a calcite ou o quartzo, e rochas detríticas, clastos, conglomerados (Pereira, 1985).

Conforme Pereira (1985), o preenchimento das descontinuidades poderá ter ocorrido em duas situações distintas: o material de preenchimento é contemporâneo da formação das descontinuidades, ou então o material de preenchimento é posterior à formação das mesmas. Neste último caso, o enchimento é o resultado da desagregação ou decomposição das rochas que se encontram adjacentes à descontinuidade.

A presença de material de enchimento é importante, uma vez que influencia o comportamento mecânico e hidráulico da descontinuidade, pelo que devem ser reconhecidos e descritos todos os aspetos que dizem respeito às suas propriedades e estados.

Para que se possa efetuar uma correta caracterização do preenchimento de uma descontinuidade, foi proposto pela ISRM (1978) uma classificação onde é sugerido que as medições feitas sejam efetuadas com uma fita métrica, tomando nota das principais características do enchimento: mineralogia do material, tamanho do grão ou das partículas, existência de água e permeabilidade e outros aspetos que se considerem pertinentes para a caracterização do mesmo. A caracterização do preenchimento é importante dado que é um fator que condiciona as particularidades de percolação de água nas descontinuidades. Como caso de exemplo, considere-se os preenchimentos compostos maioritariamente por materiais

argilosos, que se mostram adversos no que diz respeito à resistência ao corte das descontinuidades quando se verifica a presença de água.

f) Percolação ou infiltração

É bastante comum verificar-se a existência, ou até mesmo, a presença de água ao longo das paredes de descontinuidades, dado que são caminhos preferenciais para a circulação da mesma, sendo por isso um dos fatores que mais relevância assume no controlo estrutural do maciço, uma vez que é uma das fundamentais particularidades que influencia as situações de instabilidade relacionadas com descontinuidades.

Segundo a ISRM (1978), o termo infiltração encontra-se relacionado com o fluxo de água e humidade livre, que é possível visualizar nas descontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo. Na tabela 10, encontra-se a classificação proposta pela ISRM (1978).

Tabela 10 - Avaliação da percolação de água em descontinuidades (ISRM, 1978).

Classe	Descontinuidades sem enchimento	Descontinuidades com enchimento
I	A descontinuidade é apertada e seca, não aparenta ser possível a circulação de água	Material de enchimento fortemente consolidado e seco; um fluxo significativo é improvável graças à baixa permeabilidade
II	A descontinuidade é seca e sem evidência de fluxo de água	O material de enchimento é húmido, mas sem a presença de água livre
III	A descontinuidade é seca, mas mostra evidências de fluxo de água, i.e., marcas de oxidação, etc	Material de enchimento está molhado, com gotejamento ocasional
IV	A descontinuidade é húmida, mas sem presença de água livre	Material de enchimento mostra sinais de lavagem, fluxo de água contínuo - deve ser estimado o caudal (L/min)
V	A descontinuidade apresenta percolação com gotejamento ocasional, mas sem fluxo contínuo	Material de enchimento localmente lavado, fluxo considerável nos canais de circulação preferenciais - deve ser estimado o caudal (L/min) e a pressão (bar)
VI	A descontinuidade apresenta um fluxo de água contínuo - deve ser estimado o caudal (L/min) e a pressão	Material de enchimento completamente lavado, pressões de água elevadas - deve ser estimado o caudal (L/min) e a pressão (bar)

2.4. Técnica de amostragem linear aplicada a superfície de descontinuidades

Do ponto de vista prático, torna-se impossível estudar detalhadamente a totalidade da compartimentação dos maciços rochosos da área em questão. Assim, é preferível efetuar o estudo desses maciços através de uma amostragem representativa dos mesmos. Para tal, é fundamental que o estudo compreenda a identificação, breve exposição das condições gerais das superfícies expostas, bem como a caracterização dos diversos fatores geológico-geotécnicos, a litologia e o material-rocha, estado de alteração, análise das descontinuidades e ainda as condições hidrogeológicas (Pereira, 2007). Portanto, o estudo dos maciços deve ser efetuado com recurso à técnica de amostragem linear com base nos “*Basic Geotechnical Description of Rock Masses*”, também designada por BGD (Pereira, 2007). Esta técnica encontra-se amplamente descrita por diversos autores, entre os quais Priest & Hudson (1981), Hudson & Priest (1983), Dinis da Gama (1995), Chaminé & Gaspar (1995), Peacock *et al.*, (2003), Brady & Brown (2004), Peacock (2006) e Martins *et al.*, (2006).

A técnica de amostragem linear, figura 13, traduz-se na colocação de uma fita graduada nas superfícies expostas do maciço, e no registo dos critérios geológico-geotécnicos das descontinuidades intersectadas pela fita ao longo do seu comprimento (Martins, 2011). Esta técnica possibilita a concentração da amostragem efetuada ao longo da extensão da linha, através de uma ordem bem estabelecida. Assim, não se coloca a necessidade de se medir todas as descontinuidades existentes numa superfície exposta do maciço, minimizando o risco de levantamentos repetidos, tornando a análise da compartimentação mais precisa. A compartimentação do maciço é caracterizada através da extrapolação dos dados conseguidos.

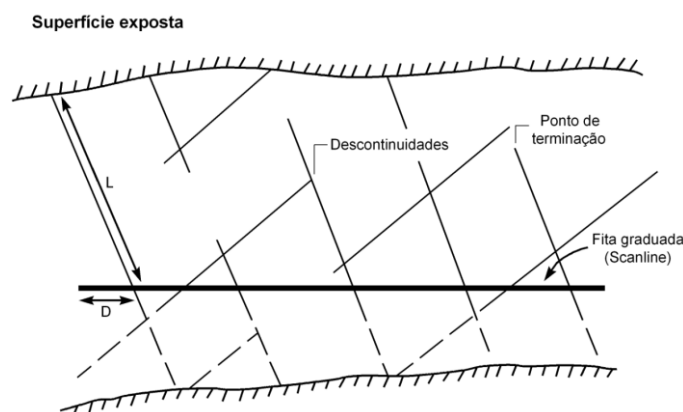


Figura 13 - Esquema para o levantamento de descontinuidades através da técnica de amostragem linear em faces expostas do maciço rochoso (Singhal & Gupta., 2010). D - Distância à origem da fita graduada ("scanline"); L- Semi comprimento exposto.

Na prática, a fita graduada deve estar o mais esticada possível, de forma a evitar o arqueamento da mesma, minimizando os erros nas medições. O local onde a técnica é aplicada, deve ser, sempre que possível, fotografado, identificado e numerado.

Como já referido anteriormente, a fita deve ser colocada nas superfícies expostas do maciço, conforme a figura 13, de forma a intersectar o maior número de descontinuidades. O levantamento de dados deve ser efetuado de forma sistemática e uniforme, devendo ser registado as grandezas abaixo descritas para cada descontinuidade que intersecte a fita:

- Distância à origem da fita graduada;
- Altura do solo à fita graduada;
- Semi comprimento exposto, isto é, o comprimento observável da interseção da descontinuidade com a face visível da rocha, somente para um dos lados da fita graduada;
 - Atitude geológica da descontinuidade - medição da direção e inclinação junto ao ponto de interseção da linha de amostragem com a descontinuidade;
 - Rugosidade (R), de acordo com a classificação proposta pela ISRM (1978);
 - Estado de alteração (W), de acordo com a classificação proposta pela ISRM (1978);
 - Observações diversas que sejam relevantes na caracterização das descontinuidades (tipologia do preenchimento, percolação de água, entre outras).

Os dados observáveis e recolhidos devem ficar registados numa ficha de levantamento de descontinuidades, que se encontra no Anexo I.

Em conjunto com a ficha, deve ficar registado informações sobre a linha de amostragem, face exposta do maciço e dados gerais, nomeadamente:

- Sentido da leitura;
- Localização da linha de amostragem;
- Número da linha de amostragem;
- Orientação espacial da linha de amostragem;
- Litologia;
- Direção do talude;
- Data do levantamento;
- Nome do responsável pelo levantamento.

Apesar desta técnica descurar a representatividade das descontinuidades subhorizontais, dado que se encontram paralelas à fita, estas devem ser sempre registadas e cartografadas, se detetáveis. Caso se verifique, numa observação mais cuidada, que as descontinuidades horizontais e subhorizontais são as mais representativas, a técnica de amostragem linear deverá ser efetuada com a fita graduada esticada na vertical (Singhal *et al.*, 2010).

O equipamento de campo básico usado para o levantamento da técnica de amostragem linear encontra-se representado na figura 14.



Figura 14 - Material de campo básico para o levantamento pela técnica de amostragem linear (Vallejo *et al.*, 2002).

2.5. Caracterização geométrica das descontinuidades

2.5.1. Famílias e sistemas de descontinuidades

De uma forma geral, no decorrer da análise de um maciço rochoso, verifica-se que a distribuição das descontinuidades apresenta uma certa regularidade, relativamente à presença, espaçamento, orientação, bem como características físico-mecânicas. Pereira (1985), definiu como uma família de descontinuidades, o conjunto de todas as descontinuidades que apresentam idêntica orientação. Desta forma, é fácil perceber que em função no número de famílias de descontinuidades e do espaçamento entre elas, resulta o grau de intensidade de fraturação, bem como o tamanho dos blocos da matriz rochosa - Tabela 11.

Uma vez agrupadas as famílias de descontinuidades pela sua orientação, é importante tratar as mesmas estatisticamente, para que se possa apurar a orientação média de cada família. Conforme a área de estudo a ser tratada, é recomendado pela ISRM (1978) que sejam cartografadas um mínimo de 150 descontinuidades. Entre as famílias de descontinuidade, a família principal é aquela que apresenta um maior grau de penetrabilidade, ou seja, maior persistência, espaçamento menor e maior abertura.

Tabela 11 - Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1978).

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Maciço compacto. Descontinuidades ocasionais e dispostas de forma aleatória.
II	Uma família de descontinuidades.
III	Uma família de descontinuidades. Presença de algumas descontinuidades ocasionais e dispostas aleatoriamente.
IV	Duas famílias de descontinuidades.
V	Duas famílias de descontinuidades. Presença de algumas descontinuidades ocasionais e dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades. Presença de algumas descontinuidades ocasionais e dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço de rocha muito esmagada, aspeto idêntico a um solo.

2.5.2. Representação gráfica das descontinuidades

Torna-se impensável poder efetuar os registos de todas as descontinuidades existentes num maciço rochoso. Para simplificar o processo de cartografar as descontinuidades, deve-se procurar ver o maciço através de uma fotografia aérea, que fornece as primeiras impressões a nível regional, para que se possam definir orientações médias ou preferenciais das descontinuidades.

No entanto, permanece uma questão no estudo e caracterização das descontinuidades referente à amostragem. Neste sentido, considerando as características geométricas das descontinuidades foram criados modelos estatísticos, para que a estas expressassem a sua representatividade, nomeadamente:

- Método da roseta;
- Projeção hemisférica;
- Diagrama de isodensidades.

Apesar de apenas serem mencionados três métodos, existem muitos outros, conforme as necessidades de cada projeto.

a) Método da Roseta

O método da roseta é um dos diversos métodos de representação gráfica da orientação das descontinuidades. É de simples execução, onde é disponibilizado uma base circular repartida de 0° a 360°, usualmente em setores de 10°; cada setor corresponde às direções das descontinuidades, onde o número de medições efetuadas para cada família é obtido pelo comprimento do respetivo setor, medido desde o centro do círculo - Figura 15. Desta forma, não há forma de mostrar a inclinação individual de cada descontinuidade, indicando apenas o intervalo das variações das inclinações das descontinuidades que pertencem a cada família (Lima *et al.*, 2012).

Por este motivo, este método é considerado limitado no que toca à informação que contém, dado que apenas fornece campos de valores, de onde se extraem as direções predominantes.



Figura 15 - Representação da orientação das descontinuidades através do método de roseta (Lima et al., 2012).

b) Projeção hemisférica

A projeção hemisférica possibilita a representação de formas espaciais, no plano, quer sejam planares ou lineares. É uma técnica fundamental para ciências como Geologia, Cristalografia, Cartografia e Ciência dos Materiais, tendo diversas aplicações específicas na Geologia Estrutural.

A principal vantagem de utilização desta técnica prende-se com a facilidade de compreensão de situações geológicas complexas, uma vez que dados tridimensionais das mais diversas origens podem ser restringidos a conjuntos de planos e retas para uma melhor análise de mapas e perfis. Podem ser estudados através desta técnica sistemas estruturais complexos, nomeadamente:

- Contactos entre estruturas;
- Estruturas planares - estratificações, falhas, foliações, etc.;
- Estruturas lineares - lineações de estiramento, estrias de atrito, charneiras de dobras, etc.

Particularidades como a natureza, complexidade e escala considerada irão ter influência na interpretação geológica dos dados considerados. No entanto, o tratamento dos dados efetuado com recurso à projeção estereográfica, não é influenciada pela escala ou pela posição absoluta no espaço.

A fundamentação deste método, bem como as suas aplicações práticas, é amplamente descrita por diversos autores, como por exemplo, Goodman (1976), Hoek & Brown (1980), Hoek & Bray (1981) e Priest (1980, 1985).

A representação gráfica baseia-se nos princípios da perspetiva: a partir de um centro de perspetiva e considerando uma esfera e um plano a ela tangente, os raios que se afastam do centro projetam pontos da superfície da esfera sobre o plano. A intersecção do plano com a superfície da esfera é designada de *círculo maior* e corresponde ao perímetro da área a sombreado na figura 16. A reta que passa pelo centro da esfera e é perpendicular ao plano, intersecta a esfera em dois pontos opostos, indicados como *polos do plano* (Lima et al.,

2012). Para a representação dos dados do plano e para que se possa trabalhar sobre esses mesmos dados, apenas é necessário um hemisfério, dado que o *círculo maior* e os *polos do plano* apenas surgem nas partes superior e inferior da esfera.

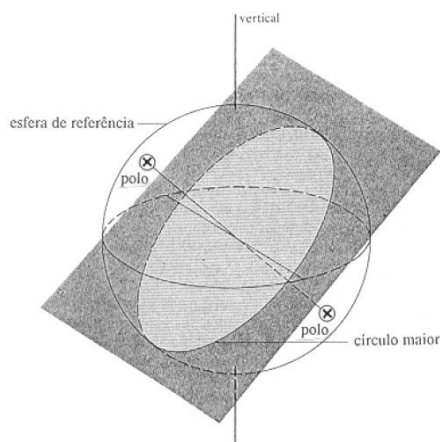


Figura 16 - Círculo maior e polos do plano definidores da orientação de um plano (Lima et al., 2012).

Possibilita a representação de círculos maiores e polos no plano horizontal, que contém o plano equatorial, sendo esta conseguida através da união dos pontos do círculo maior sobre a esfera de referência e polo com o ponto de interseção da reta vertical que passa pelo centro da esfera.

A representação dos planos e respetivos polos pode ser efetuada com recurso a uma rede de projeção estereográfica. Existem duas redes de projeção possíveis, a rede de projeção de Wulff e a de projeção de Schmidt, figura 17 (a) e (b), respetivamente.

Os designados círculos maiores da rede fazem a representação de planos com retas de níveis segundo a orientação N-S, com pendores intervalados de igual valor, geralmente 10° . Por ser considerada uma projeção de igual ângulo, os círculos maiores da rede são considerados como arcos circulares de centro na reta de suporte do eixo E-W, no caso da figura 17 (a). É ainda possível verificar a existência dos denominados círculos menores nas redes de projeção.

No caso da figura 17 (b), trata-se de uma projeção de igual área, onde o espaçamento entre a malha é de 10 cm, geralmente (Lima et al., 2012).

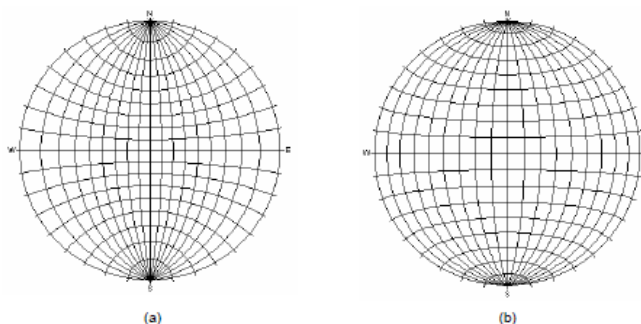


Figura 17 - Redes de projeção: (a) - igual ângulo (Wulff); (b) - igual área (Schmidt) (Lima et al., 2012).

Na figura 18 encontra-se a representação de um plano com a direção 230° e um pendor de 40° , quer na rede de projeção de igual área quer na rede de igual área.

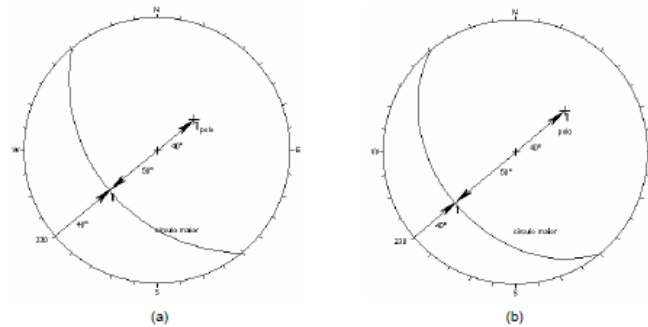


Figura 18 - Representação do plano N40/40SW e respectivos polos: (a) - igual ângulo; (b) - igual área (Lima et al., 2012).

c) Diagrama de isodensidades

Possuindo um elevado número de dados relativos às orientações das descontinuidades medidas no campo, é exequível a sua representação num dos sistemas já referidos e, a partir daí, reconhecer as principais famílias de descontinuidades, bem como, determinar a orientação mais representativa das mesmas; para cada uma desta é ainda possível verificar a dispersão das orientações relativamente à orientação mais representativa.

Torna-se vantajoso efetuar a representação dos planos através dos polos, de forma a facilitar o tratamento dos dados no que diz respeito às orientações. Apesar de a representação poder ser efetuada através de um dos métodos já descritos, é aconselhável o uso de uma rede polar - Figura 19.

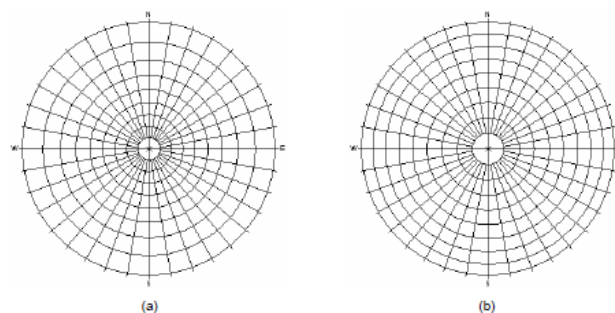


Figura 19 - Redes polares: (a) - projeção igual ângulo; (b) - projeção igual área (Lima et al, 2012).

Na figura 20 é demonstrado um exemplo de 387 descontinuidades medidas num determinado local, onde se verifica a sua representação pelos seus polos, quer por projeção igual ângulo, quer por projeção de igual área. A partir daqui é possível efetuar-se a análise das concentrações dos polos das descontinuidades, bem como definir as orientações com maior representatividade das famílias de descontinuidades.

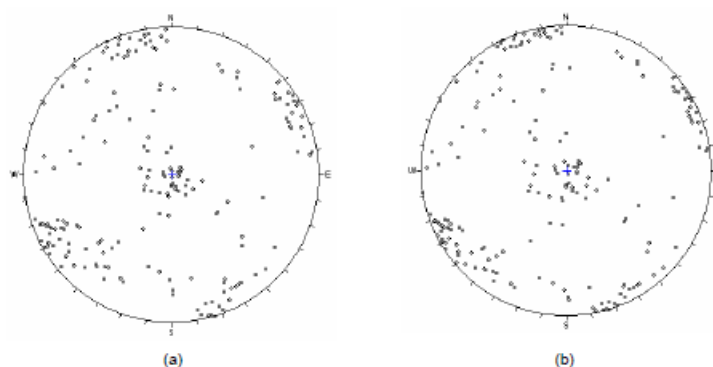


Figura 20 - Representação dos polos de 387 descontinuidades: (a) - projecção igual ângulo; (b) - projecção igual área (Lima et al., 2012).

Presentemente, existem diversos softwares que possibilitam o tratamento dos dados recolhidos informaticamente. Geralmente, os softwares habilitados para tal, permitem o traçado de curvas de isodensidades de concentração de polos, bem como a aquisição de outros dados de elevado interesse. Na figura 21, é possível ver os resultados do tratamento das descontinuidades da figura 20, nos diagramas conseguidos pelo *software DIPS*. As cores assinalam as áreas de diferentes concentrações de polos, conforme a legenda, definindo-se assim, quais as famílias mais importantes (Lima et al., 2012).

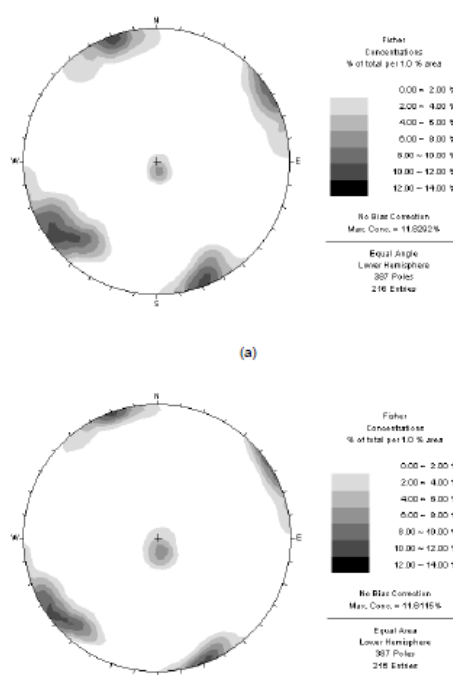


Figura 21 - Curvas de isodensidades de concentração de polos com representação na figura 24: (a) - projecção igual ângulo; (b) - projecção igual área (Lima et al., 2012).

Capítulo 3.

Enquadramento geológico e geotécnico

3. Enquadramento geológico e geotécnico

3.1. O Maciço Ibérico e a Orogenia Varisca

Em Portugal Continental é possível reconhecer duas grandes unidades geoestruturais: o Maciço Ibérico, referente ao Ciclo de Wilson Varisco (560-245 Ma) e que comporta três quartos do nosso país, e as Orlas Mezo-Cenozóicas, terrenos de formação mais recente e compostos predominantemente por rochas carbonatadas e formações arenosas (Ribeiro *et al.*, 1979).

É no Maciço Ibérico que se encontram as rochas ante-mesozóicas formadas e estruturadas ao longo do Ciclo de Wilson Varisco, evidenciando o magmatismo e o metamorfismo associado a este ciclo. A fase final deste ciclo envolveu o fecho de uma bacia oceânica e como consequência, levou à colisão de duas grandes massas continentais, levando à amalgamação de diversas formações geológicas (Ribeiro *et al.*, 1979).

O zonamento do Maciço Ibérico, figura 22, apenas foi possível ser efetuado graças às diferenças descobertas, tanto no carácter tectónico, como no nível paleogeográfico, e no metamorfismo e magmatismo de cada uma das zonas. Cada zona encontra-se separada por acidentes tectónicos principais, insinuando o controlo da zonalidade por intermédio de falhas profundas que separam compartimentos crustais de natureza diferente (Ribeiro *et al.*, 1979).

Em Portugal Continental, é possível encontrar as seguintes zonas, pertencentes ao Maciço Ibérico:

- Zona de Galiza-Trás-os-Montes (ZGTM);
- Zona Centro-Ibérica (ZCI);
- Zona de Ossa Morena (ZOM);
- Zona Sul Portuguesa (ZSP).

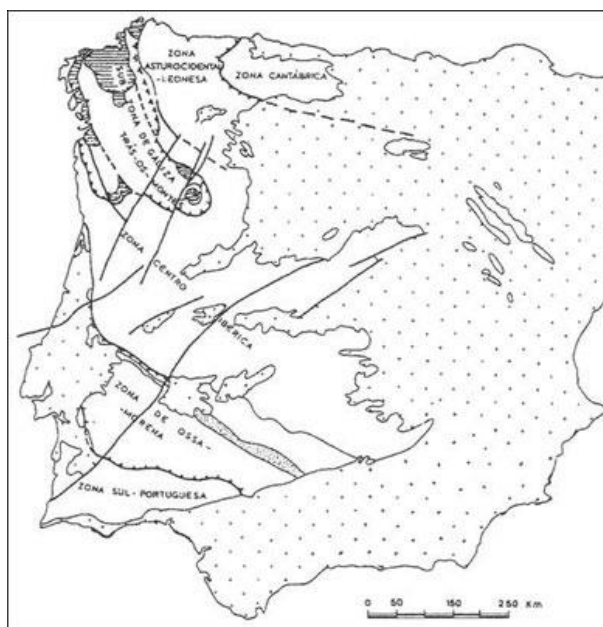


Figura 22 - Zonamento paleogeográfico do Maciço Ibérico e respetiva tectónica, segundo o Mapa Tectónico da Península Ibérica modificado. As coberturas sedimentares encontram-se representadas pelo ponteadado (Ribeiro *et al.*, 1979).

3.2. Evolução geológica do Maciço Ibérico

No enquadramento do Ciclo de Wilson, é referido que os granitoides se encontram intimamente relacionados com o processo orogénico Varisco, muito graças à fusão crustal que proporcionou a sua origem e os seus mecanismos de instalação (Ribeiro *et al.*, 1979). Num processo orogénico, são reconhecidas três etapas na evolução de uma cadeia montanhosa. A primeira fase corresponde a uma fase de sedimentação, seguida de tectogénese (segunda fase), que diz respeito à deformação dos materiais já sedimentados, formando a cordilheira. Por fim, a última fase corresponde ao reajustamento isostático, que consiste na erosão das cordilheiras formadas, e soerguimento de rochas formadas em profundidade, como por exemplo, as rochas plutónicas.

Assim, de forma sucinta, durante o Ciclo de Wilson Varisco ocorreram:

a) Etapas extensionais

Segundo Peixoto (2008), o Maciço Ibérico sofreu uma evolução Pré-Câmbrica e Paleozoica antes da orogenia ocorrer, querendo isto dizer que a plataforma esteve submetida a inúmeros processos extensivos de *rifting* continental. Estes processos evolutivos terminam no Silúrico, aquando da geração da bacia oceânica. É nesta bacia que se deposita totalmente a espessa sequência sedimentar, de idades variadas, desde o Câmbrico até ao Devónico Inferior. Atualmente, essa sequência encontra-se exposta nos amplos afloramentos metassedimentares da ZCI.

b) Etapas convergentes

No início do Devónico médio, terá começado o processo de inversão da tectónica Varisca, e que se prolongou até ao fim do Paleozoico. Este processo compreende a mudança de um regime de extensão - separação de dois blocos litosféricos com criação de um oceano de permeio - para um regime de encerramento desse mesmo oceano, graças à convergência litosférica.

Aqui ocorre uma complexa sequência de processos geológicos, nomeadamente, deformação, metamorfismo e magmatismo. Esta sequência de processos é denominada de Orogenia Varisca. A orogenia é caracterizada por uma série de fases principais, que originou uma sobreposição de efeitos morfológicos, como por exemplo, dobras, xistosidades e cavalgamentos. A morfologia hoje apresentada pelo Maciço Ibérico é então consequência da Orogenia Varisca, que se pode definir como um complexo método de convergência, que resultou no choque do Bloco Autóctone Ibérico com outros continentes (Peixoto, 2008; Carvalho, 2010).

A marca da Orogenia Varisca no Maciço Ibérico deu-se em três fases de deformação diferentes, comumente designadas por F_1 , F_2 e F_3 . Importa referir que em alguma bibliografia utiliza a nomenclatura D_1 , D_2 e D_3 .

O primeiro episódio, ou F_1 , teve lugar ao longo do Devónico e, dentro de todos os episódios de deformação, foi o mais relevante e o que mais teve influência nas principais estruturas patenteadas na ZCI. Aqui, destacam-se as dobras subverticais de vasta amplitude e de direções variáveis, sendo proeminente a direção NW-SE (Peixoto, 2008).

No que diz respeito à etapa F_2 , esta causou uma sobreposição de novas estruturas, comparativamente às que foram formadas em F_1 . Esta sobreposição ocorreu graças à particularidade rotacional da fase em causa, levando à formação de zonas de cisalhamento subhorizontais. As rochas graníticas pré-orogénicas que apresentam foliação e lineação são

indicadoras de uma provável conexão a esta fase (Peixoto, 2008). A passagem da etapa F_1 para a etapa F_2 encontra explicação na geometria, através de uma virgiação do Arco Ibero Armoricano, pelo que se pondera que provavelmente F_2 é uma continuação de F_1 (Peixoto, 2008).

Relativamente à etapa F_3 , esta foi a causadora da geração de dobras do plano axial subvertical, mostrando atividade pela reativação de estruturas pré-existentes.

O Maciço Ibérico foi alvo de diversos episódios tectónicos de fraturação aquando do final da Orogenia Varisca. Estes episódios causaram um sistema *horst* e *graben*, subjugados a um conjunto de fraturas com direcções NE-SW, NNE-SSW e NW-SE (Peixoto, 2008). Esta etapa final é preponderante para o entendimento da estrutura frágil que os granitoides centro-ibéricos apresentam.

No período tardi a pós- F_3 , ocorre uma deformação em regime dúctil e frágil, provocando o aparecimento de fraturas de acordo com dois sistemas conjugados: um com direcção NNW a NW-SE e outro com direcção NNE-SSW a ENE-WSW (Ribeiro *et al.*, 1979).

c) Pós Orogenia Varisca

No final da Orogenia Varisca, através de processos de erosão e compensação isostática, os movimentos já começados ao longo das últimas etapas orogénicas, conduzem ao soerguimento das rochas granitoides, hoje em dia, aflorantes à superfície (Ribeiro *et al.*, 1979).

3.3. Zona Centro-Ibérica

A Zona Centro-Ibérica encontra-se delimitada pela falha de Vivero e pelo sinclinal de Sil-Trucha a NE; o cavalgamento de Ferreira do Zêzere e a zona de cisalhamento de Porto-Tomar delimita a zona a oeste; já a sul, a zona é delimitada pelo alinhamento tectonomagmático de Los Pedroches-Vegas-Altos-Albuquerque-Nisa e a dobra monoclinal de Guadalquivir (Peixoto, 2008, adaptado de Martinez Catalán, 1985).

Ao longo da ZCI afloram espessas sequências alternadas de xistos e metagrauvaques com intercalações de quartzitos, metaconglomerados e carbonatos.

A modificação geotérmica crustal que ocorre durante os processos de convergência litosférica está intrinsecamente relacionada com o metamorfismo existente, que se caracteriza como plurifacial e que também se encontra, embora numa fase posterior, com as intrusões de rochas granitoides (Ferreira *et al.*, 1987).

É na ZCI que se encontra o maior afloramento de granitos, em extensão, e que apresentam uma elevada diversidade tipológica, ao longo da Cadeia Varisca Europeia (Azevedo e Aguado, 2006) - Figura 23, onde são distinguíveis diversos tipos de granitos.

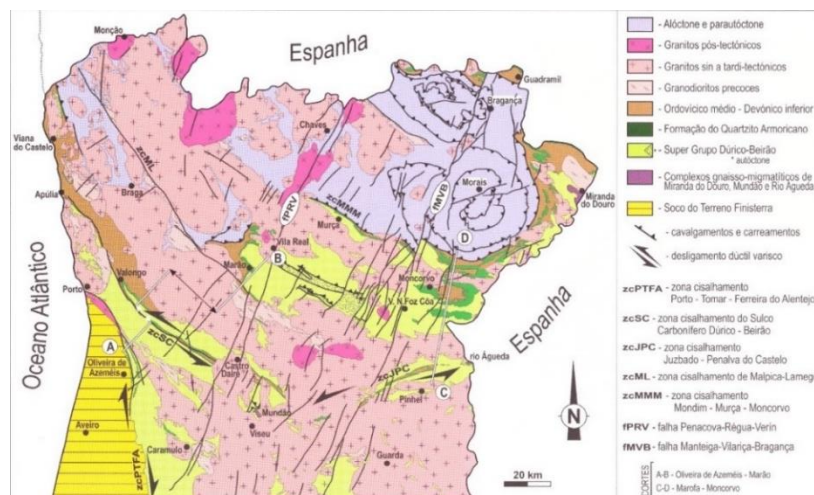


Figura 23 - Enquadramento geológico dos setores setentrionais do autóctone da ZCI (Azevedo e Aguado, 2006)

3.4. A origem e a instalação dos granitos

a) Classificação geral dos granitos

Os granitoides biotíticos e os gabros são, predominantemente, intrusões pré-orogénicas com cerca de 460 a 480 Ma. Como testemunhos do magmatismo sinorogénico do Varisco, existem os granitos e granodioritos de há cerca 300 Ma. Estes mesmos granitos são característicos por apresentarem duas micas e por, regularmente, se associarem a aplitos e pegmatitos; no entanto, também é possível encontrarem-se granitos biotíticos. Na fase tardi-Varisco, destacam-se os granitos calco-alcalinos.

Assim, de forma sucinta e segundo Capdevilla & Floor (1970), os granitoides da Zona Centro-Ibérica podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Granitoides de duas micas, intrinsecamente relacionados com migmatitos e áreas de elevado grau metamórfico;
- Granitoides e granitos biotíticos calco-alcalinos frequentemente ligados a rochas ígneas máficas e intermédias.

Na sequência alcalina, é destacada a presença das plagioclases sódicas e/ou oligoclase ácida; dá-se ainda importância ao domínio da moscovite e biotite em teores equivalentes (Ferreira, 2001). Os granitos que se encontram nesta série apresentam uma propensão para acompanhar os intervalos de deformação, caracterizados por episódios de compressão. Estes granitos podem ser categorizados da seguinte forma (Ferreira *et al.*, 1987).

- Granitos gnaissicos, com cerca de 350 Ma de idade, afetados em grande parte pela fase F_1 - primeira fase da deformação Varisca;
- Granitos de duas micas autóctones, relacionados com migmatitos e granitos de anatexia e parautoctones, relativamente deformados, com cerca de 300 Ma, e coexistentes da fase F_2 - segunda fase de deformação Varisca;
- Granitos de duas micas e que apresentam megacristais, alóctones e tardios.

Relativamente à série calco-alcalina, esta destaca-se pela presença das plagioclases calco-sódicas nos granitos, ou seja, por apresentarem albite e anortite; importa ressaltar que a biotite apresenta uma predominância sobre a moscovite (Ferreira *et al.*, 1987). Os granitos existentes nesta série, podem ser categorizados da seguinte forma:

- Granitos com cerca de 320 Ma, deformados pela fase F_2 do Varisco e com biotite e megacristais;
- Granitos com cerca de 280 Ma, de origem pós-tectónica, em maciços definidos. São distinguíveis granitos calco-alcalinos a alcalinos, de duas micas e de grão médio a fino e os granitos calco-alcalinos, de grão grosseiro e com megacristais. O aparecimento dos granitos pós-tectónicos encontra-se associado a diversos tipos de procedimentos que resultam da fraturação tardi-Varisca.

b) Idade de instalação

De uma forma geral, os granitoides que se podem encontrar na ZCI, acompanham alinhamentos perfeitamente definidos, comumente áreas de cisalhamento dúctil, e associados à Orogenia Varisca. Desta forma, é possível efetuar uma divisão dos mesmos granitos em dois grandes grupos, granitoides sinorogénicos e granitoides tardi a pós-orogénicos (Ferreira *et al.*, 1987).

Com a formação de um *flake* deu-se o início do modelo geodinâmico, onde desde do Devónico Médio, que se gerou obducção com posterior colisão das margens continentais e ainda subducção para Este. Considera-se que com os processos de subducção se encontram relacionados os magmas que originaram os granitoides sinorogénicos. Os granitoides e rochas básicas secundárias têm a sua origem no calor oriundo da ascensão dos magmas, que causou a ascensão das isogeotermas levando à fusão de elevadas quantidades da crosta continental (Ferreira *et al.*, 1987).

A fase de deformação Varisca F_3 encontra-se registada nos extensos conjuntos graníticos, comprovando uma época de distensão anterior a F_3 e que, possibilitou a subida dos diversos magmas existentes na crosta. Considerando a idade de instalação dos granitoides e tendo em conta a razão supracitada, é comum que os granitoides assumam a classificação ante- F_3 e sin- F_3 . Os primeiros granitoides a serem instalados e que evoluíram para granitos biotíticos com “restitos” e de duas micas, foram os granitoides ante- F_3 . Estes granitos são encontrados preferencialmente, nas imediações das zonas onde ocorreram colisões continentais, que originaram o espessamento crustal. Os magmas que deram origem aos granitos emergiram ao longo de alinhamentos antigos e expressam o resultado da fusão parcial dos sedimentos que se encontram nesses mesmos alinhamentos (Ferreira *et al.*, 1987).

Os granitoides criados apenas na terceira fase de deformação Varisca, F_3 , são bastante diversificados, apresentando diferentes texturas e composições conforme a sua origem. Regra geral, os granitos de origem profunda apresentam-se como sendo biotíticos, com plagioclase cálcica e derivados; estes podem ter tido origem na fusão de gnaisses e xistos pelíticos. Por outro lado, os granitos com origem na fusão parcial dos sedimentos mais hidratados, deram origem a granitos biotíticos com “restitos” ou granitos de duas micas (Ferreira *et al.*, 1987).

Relativamente aos granitoides tardi a pós-orogénicos, ou seja, granitoides formados após a terceira fase de deformação Varisca, F_3 , apresentam-se como biotíticos com plagioclase cálcica e, portanto, são considerados altamente homogéneos. Dados referentes a análises da composição química de alguns maciços apontam para granitos de origem profunda, que tiveram origem num magma básico fragmentado pobre em terras raras. Atendendo à zonalidade composicional, esta é reveladora de atividades magmáticas em toda a extensão de uma zona de subducção, com pendor para NE (Ferreira *et al.*, 1987).

c) Classificação genética

De uma forma simples, os granitoides podem ser categorizados em mesocrustais e infracrustais (ou basocrustais). Os granitoides que se encaixam na categoria dos mesocrustais, podem ser formados por dois tipos de anatexia, anatexia húmida ou induzida, por interferência de fluidos e outros compósitos químicos provenientes de magmas calco-alcalinos, com origem profunda, regulados pelas condições do metamorfismo regional. Relativamente aos granitoides infracrustais, não apresentam correlação com as condições de metamorfismo regional e são de origem muito mais profunda do que os mesocrustais. Estes granitoides apresentam-se como um grupo deveras heterogéneo, dado que o material genético terá tido origem na diferenciação magmática do material básico infracrustal e na fusão parcial da matéria da crosta, com ou sem hibridização do material básico infracrustal (Ferreira *et al.*, 1987).

d) Classificação geoquímica e petrográfica

É possível classificar os granitoides colocando-os em dois grandes grupos, o grupo dos alcalinos e o dos calco-alcalinos. Este tipo de classificação não é simples, dado que existem granitos de idades geológicas diferentes, o que leva à criação de subgrupos. Para além disso, e apesar de algumas fácies estarem abrangidas na série alcalina, estas apresentam uma certa tendência para a série calco-alcalina, tendo os leucogranitos a título de exemplo (Ferreira *et al.*, 1987).

e) Classificação estrutural e geocronológica dos granitoides ibéricos e a sua localização na ZCI

Os granitoides que registaram os efeitos da última fase da deformação varisca, apresentam-se como um grupo bastante variado e vasto, comprovando a existência de descontinuidades nas ações compressivas, entre esta última fase e as anteriores (Ferreira *et al.*, 1987).

Na tabela 12, por forma a ser mais compreensível, encontra-se a classificação estrutural e geocronológica dos granitoides da Zona Centro-Ibérica.

Tabela 12 - Classificação estrutural e geocronológica dos granitoides ibéricos (adaptado de Ferreira *et al.*, 1987).

Classificação		Fácies mais comuns	Idades U-Pb
Granitoides Tardi-pós-F ₃	<i>Younger</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Granitos biotíticos, biotítico-moscovíticos e de duas micas, por vezes porfiroides; - Granitos maioritariamente biotíticos e muitas vezes porfiroides; - Gabros, dioritos, monzodioritos quartzíticos, granodioritos. 	310 - 290 Ma
Granitoides Sin-F ₃	<i>Older</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Leucogranitos e granitos de duas micas, de deformação variável; - Granodioritos e granitos biotíticos, de deformação variável. 	320 - 310 Ma
Granitoides Ante-variscos	<i>Oldest</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Granitoides do Proterozoico Superior ao Paleozoico Inferior (ortognaisses) 	482 - 582 Ma

A distribuição espacial dos tipos de granitoides variscos demonstra que as fácies mais deformadas, e por consequência as mais antigas, encontram-se localizadas sob as principais

zonas de cisalhamento dúctil, correlacionadas com a 3ª fase de deformação. Por outro lado, as fácies menos deformadas distanciam-se de forma gradual da linha que determina o plano de cisalhamento em superfície, mantendo, contudo, os alinhamentos sub-paralelos às fácies precedentes (Ferreira *et al.*, 1987).

Os granitoides sin- F_3 biotíticos, os mais deformados, encontram-se dispostos ao longo de quatro alinhamentos principais - Figura 24:

- Alinhamento ocidental - abrange os afloramentos de Ermesinde, Póvoa de Varzim a Barcelos. Coincidente com o sulco carbonífero Dúrico-Beirão;
- Alinhamento intermédio - engloba os afloramentos de Loureiro-Boalhosa, S. Silvestre, Candemil, Bom Jesus e Sameiro em Braga, Atães, Felgueiras, Ucanha, Barragem de Vilar e Sernancelhe, sendo estes dois últimos no prolongamento a SW. É o alinhamento de maior representatividade e segue o cisalhamento Vigo-Régua;
- Alinhamento oriental - segue o cisalhamento Laza-Rebordelo, e engloba o maciço de Rebordelo;
- Alinhamento do extremo nordeste - acompanha o cisalhamento Vivero-Ifanes e abarca os afloramentos Ifanes-Miranda do Douro.

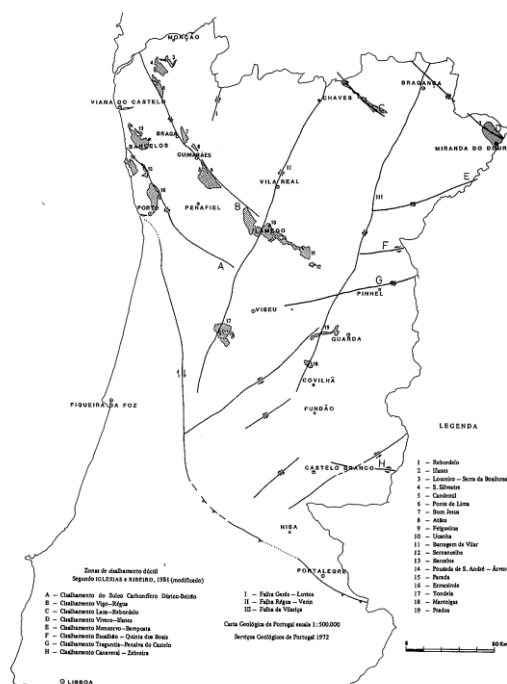


Figura 24 - Distribuição espacial dos granitoides biotíticos sin- F_3 (adaptado de Ferreira *et al.*, 1987)

Relativamente aos granitoides biotíticos tardi- F_3 , estes encontram-se distribuídos ao longo de extensas faixas, ao lado dos cisalhamentos que correspondem aos sulcos Carbonífero Dúrico-Beirão e ainda Vigo-Régua. Apresentam predomínio na zona do Minho Central e prolongam-se para a mancha das Beiras - Figura 25.

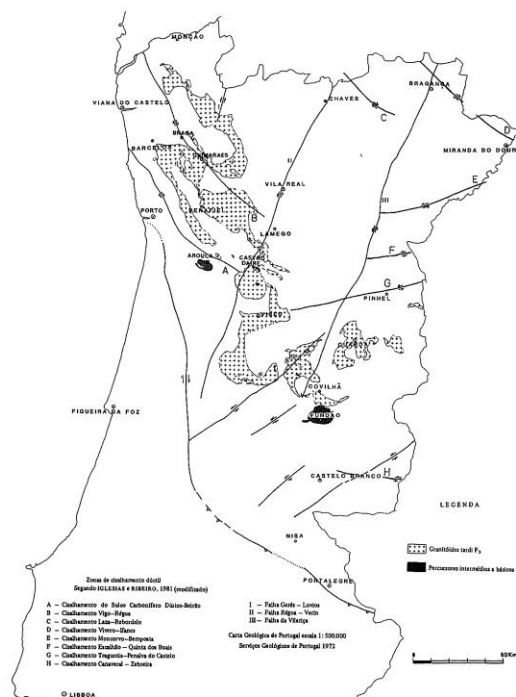


Figura 25 - Distribuição espacial dos granitoides biotíticos tardi- F_3 (adaptado de Ferreira et al., 1987).

Os granitoides biotíticos tardi-pós-F₃ ocupam, a zona mais interior entre as regiões de cisalhamento, consideradas mais importantes, nomeadamente, Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão e de Vigo-Régua. Contudo, a sua instalação tem influência por sistemas de fraturas frágeis conjugadas, NW-SE, NE-SW e ainda NNW-SSE, com destaque para o primeiro sistema, dado que é predominante - Figura 26.

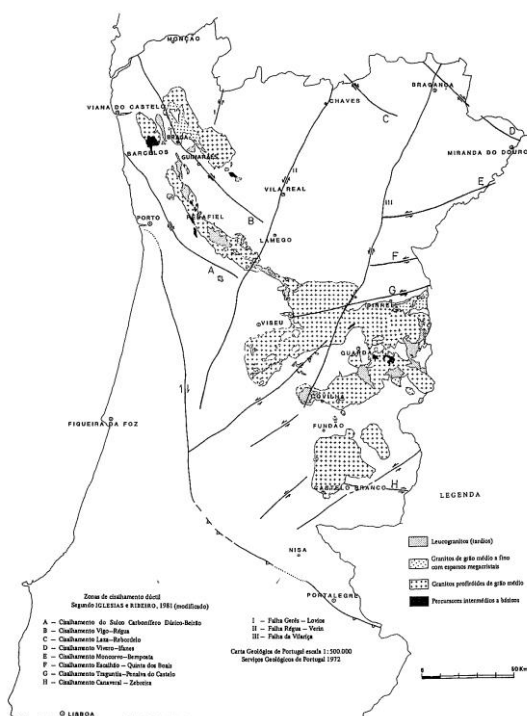


Figura 26 - Distribuição espacial dos granitoides biotíticos tardi-pós-F3 (adaptado de Ferreira et al., 1987).

Relativamente à distribuição espacial dos granitoides de duas micas, também se encontra condicionada por alinhamentos paralelos e que são coincidentes com as antiformas F_3 - Monção-Vila Real-Moncorvo e Porto-Viseu - Figura 27.

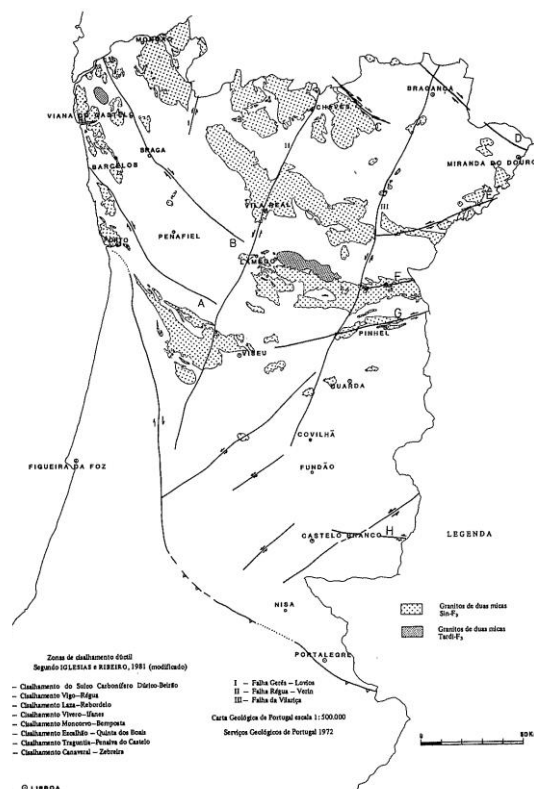


Figura 27 - Distribuição espacial dos granitoides de duas micas (adaptado de Ferreira et al., 1987).

Capítulo 4.

Estatística de dados direcionais

4. Estatística de dados direcionais

Considerando a tipologia do conjunto de dados recolhidos no campo, seria inapropriado aplicar os habituais métodos da estatística linear relativamente à análise estatística de dados considerando as variáveis em causa. Desta forma, recorre-se aos domínios da estatística circular ou direcional, habitualmente inseridos nos campos da ciência da terra (Góis, 2002).

O principal objetivo da estatística circular ou direcional é tratar dados direcionais. Quer isto dizer que se trata de um método matemático capaz de tratar, de forma estatística, conceitos como direções, vetores, eixos, polos e/ou rotações, tão importantes na geologia de engenharia (Davis, 2002).

A estatística circular assume um papel de destaque no âmbito da geologia estrutural e das informações recolhidas que daí possam surgir, uma vez que superfícies e planos de falha são caracterizados por direções e inclinações (Davis, 2002).

O uso da estatística circular em dados geológicos não é uma novidade absoluta, destacando-se o contributo de Fisher (1993) entre diversos autores.

Os dados recolhidos foram tratados com recurso ao *software Oriana* e para a representação gráfica dos mesmos, decidiu-se adotar uma forma de histograma circular, designada diagrama de roseta. É importante ter em atenção a elaboração deste tipo de diagramas.

Para que o princípio base dos diagramas de roseta seja respeitado, é imprescindível que este seja contruído de tal forma que as áreas das “pétalas” sejam proporcionais à classe de frequências. Portanto, se isto não for respeitado, pode causar uma distorção dos resultados, levando a crer que existem tendências direcionais onde estas não acontecem (Davis, 2002).

Mesmo considerando o princípio base anteriormente descrito, o aspeto do histograma é deveras sensível à seleção da largura das “pétalas”, bem como ao ponto que é definido como início. Considerando estas informações, os histogramas apresentam algumas variações entre si.

O tratamento dos dados recolhidos foi efetuado com auxílio da estatística direcional que estudou das variáveis inclinação e direção das fraturas.

4.1. Vetor unitário e resultante

Os estatísticos básicos circulares abrangem um conjunto de funções que podem vir a revelar-se úteis na exploração, interpretação e sumarização das propriedades consideradas importantes de uma amostra que reúna dados circulares.

Os dados direcionais foram ser analisados com recurso ao comprimento do vetor unitário e através da sua representação num círculo de raio unitário - Figura 28 (Sá, 2007). Assim, a direção dominante num dado conjunto de vetores pode ser descoberta pelo vetor resultante.

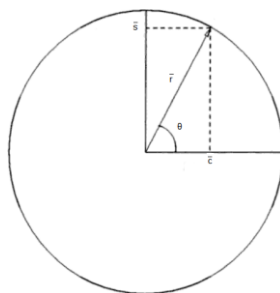


Figura 28 - Representação de um vetor unitário (Barbosa, 2013).

Segundo Davis (2002), um vetor unitário pode ser representado por coordenadas do tipo X e Y (equações 1 e 2), onde a direção é obtida pelo ângulo θ .

$$X_i = \cos \theta_i$$

(Equação 1)

$$Y_i = \sin \theta_i$$

(Equação 2)

Onde $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Para que se obtenha o vetor resultante, é necessário somar os cossenos e os senos dos vetores unitários (equações 3 e 4). Estas somas serão importantes para o posterior cálculo da média μ .

$$X_r = \sum_{i=1}^n \cos \theta_i$$

(Equação 3)

$$Y_r = \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$

(Equação 4)

4.2. Média $\mu=\theta$ e comprimento médio resultante

Dado que se tratam de dados circulares, a média a calcular não pode ser efetuada da forma comum, proposta pela estatística clássica. Desta forma, a direção média de n observações recolhidas pode ser conseguida em coordenadas cartesianas, pelas equações 5 e 6 (Sá, 2007).

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \times X_r$$

(Equação 5)

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \times Y_r$$

(Equação 6)

N é o tamanho da amostra.

O vetor que daqui resulta, $\bar{R} = [\bar{C} \ \bar{S}]$, é o vetor médio das N observações, de comprimento médio expresso na equação 7.

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2} \in [0,1]$$

(Equação 7)

O comprimento médio obtido é um critério similar à variância, mas expresso em sentido oposto. Ou seja, caso os valores de \bar{R} sejam próximos de um, então os vetores encontram-se associados e apresentam uma pequena dispersão; se os valores de \bar{R} forem próximos de zero,

significa que os vetores não se encontram agrupados e apresentam uma elevada dispersão (Davis, 2002).

Relativamente à direção média μ (com $\bar{R} \neq 0$), é um critério representativo da média angular de todos os vetores que fazem parte da amostra - Equação 8 (Davis, 2002).

$$\bar{\mu} = \begin{cases} \arctang\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right), & \text{se } \bar{C} \geq 0 \\ \arctang\left(\frac{\bar{S}}{\bar{C}}\right) + \pi \operatorname{sgn}(\bar{S}), & \text{se } \bar{C} < 0 \end{cases}$$

(Equação 8)

4.3. Moda

O cálculo da moda para dados circulares é igual ao preconizado pela estatística linear, ou seja, a moda representativa do valor de mais alta frequência na sequência dos dados considerada. A moda torna-se um indicador útil, uma vez que possibilita conhecer o valor comum entre as direções e as inclinações.

4.4. Mediana

Segundo Góis (2002), a direção mediana, $\tilde{\theta}$, para dados circulares é qualquer ângulo φ , tal que:

- i) Metade dos dados estão contidos no arco $[\varphi, \varphi + \pi]$;
- ii) A maioria dos registos estão mais próximos de φ do que de $\varphi + \pi$.

Caso a sequência de dados seja par, então torna-se conveniente adotar a mediana da amostra como sendo a média de dois pontos consecutivos mais adequados; se a sequência de dados for ímpar, a direção mediana deverá ser um dos valores que a compõem (Mardia & Jupp, 2000).

Para a obtenção dos valores da direção mediana, recorreu-se ao *software Oriana*. Contudo, esta pode ser definida segundo a equação 9.

$$d(\tilde{\theta}) = \pi - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\pi - |\theta_i - \varphi||$$

(Equação 9)

4.5. Variância

Para que se obtenha uma medida onde o crescimento seja diretamente proporcional à dispersão dos dados, recorre-se à variância circular, que pode ser expressa pela equação 10.

$$V = 1 - \bar{R}$$

(Equação 10)

Este critério encontra-se entre o intervalo zero e um, sendo um indicador da dispersão de uma série de dados - Figura 29. Caso todas as amostras indiquem para a mesma direção, o vetor resultante terá um comprimento igual a um; já a variância circular será igual a zero. Caso contrário, se as amostras demonstrarem uma dispersão ao longo do círculo, o comprimento do vetor resultante será perto de zero; a variância circular estará próxima de um.

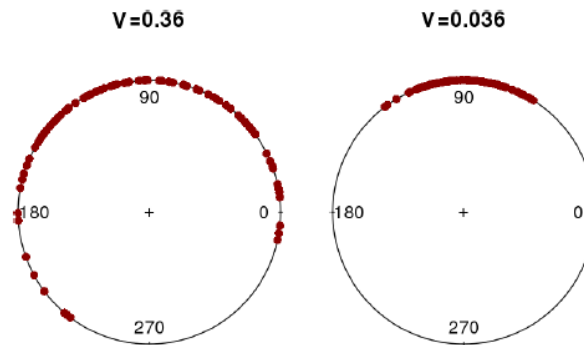


Figura 29 - Representação gráfica da variância circular (Barbosa, 2013).

No entanto, torna-se importante esclarecer de que uma variância circular perto de um, não implica, de forma necessária, uma distribuição uniforme ao longo do círculo de representação gráfica de 360° (Davis, 2002).

4.6. Desvio padrão e dispersão circular

Conseguida a variância circular, torna-se possível calcular o desvio padrão circular, que se encontra contido no intervalo de zero a infinito. O cálculo deste é possível ser efetuado através da equação 11 (Góis, 2002).

$$s = \sqrt{-2 \log(1 - V)} = \sqrt{-2 \log \bar{R}}$$

(Equação 11)

O desvio padrão circular possibilita conhecer entre que valores poderá variar o valor médio de cada amostra; ou seja, possibilita determinar entre que valores varia tanto a direção média como a inclinação média.

É possível ainda calcular a dispersão circular $\hat{\delta}$, segundo a equação 12.

$$\hat{\delta} = \frac{1 - \bar{R}_2}{2 \times \bar{R}^2}$$

(Equação 12)

Na equação 12 o \bar{R}_2 , é calculado considerando duplos ângulos, $2\theta_1, 2\theta_2, \dots, 2\theta_n$ (Mardia & Jupp, 2000). Como medida de dispersão que é, a dispersão circular tem maior impacto no estudo estatístico da variância, e varia entre zero e infinito.

4.7. Coeficiente de concentração e direção média determinada

O coeficiente de concentração $\hat{\kappa}$ pode ser expresso segundo a equação 13, e é uma medida inversa da dispersão da distribuição de dados (Góis, 2002).

$$\hat{\kappa} = \begin{cases} 2\bar{R} + \bar{R}^3 + \frac{5\bar{R}^5}{6} & \text{se } \bar{R} < 0.53 \\ -0.4 + 1.39\bar{R} + 0.43(1 - \bar{R}) & \text{se } 0.53 \leq \bar{R} < 0.85 \\ \frac{1}{(\bar{R}^3 - 4\bar{R}^2 + 3\bar{R})} & \text{se } \bar{R} \geq 0.85 \end{cases}$$

(Equação 13)

Em função do comprimento do vetor médio \bar{R} , do coeficiente de concentração $\hat{\kappa}$, e do número de observações, torna-se possível estabelecer intervalos de confiança para a direção média determinada $\bar{\theta}$ segundo a equação 14 - figura 30, (Góis, 2002).

$$\bar{\theta} \pm \sin^{-1} \left(\frac{Z_{\alpha/2}}{\sqrt{n\hat{\kappa}\bar{R}}} \right)$$

(Equação 14)

$Z_{\alpha/2}$ é indicador do valor da distribuição Gaussiana normalizada $\sim N(0,1)$, para um nível de confiança estipulado α .

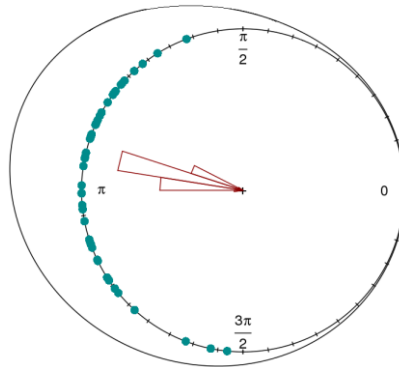


Figura 30 - Representação gráfica de um intervalo de confiança de 95% (Barbosa, 2013).

4.8. Assimetria e curtose circular

Para os dados circulares, tal como nos casos lineares, são também calculadas medidas de assimetria e curtose circular. As fórmulas de cálculo, quer para a assimetria, quer para a curtose circular, encontram-se expressas nas equações 15 e 16, respetivamente.

$$sK = \frac{(\bar{R}_2 \times \sin(\mu_2 - 2\mu))}{(1 - \bar{R})^2}$$

(Equação 15)

$$\kappa_c = \frac{\bar{R}_2 \times \cos(\mu_2 - 2\mu) - \bar{R}^4}{(1 - \bar{R})^2}$$

(Equação 16)

Para se determinar μ_2 , faz-se uso das equações 3 e 4, substituindo θ_i por $2\theta_i$, dando origem às equações 17 e 18.

$$X_r = \sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i$$

(Equação 17)

$$Y_r = \sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i$$

(Equação 18)

De seguida, faz-se uso das equações 5 e 6 para que se obtenha um novo valor médio, conforme as equações 19 e 20.

$$\bar{C}_2 = \frac{1}{N} \times X_r$$

(Equação 19)

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{N} \times Y_r$$

(Equação 20)

Uma vez obtidos estes cálculos, μ_2 é dado pela equação 21.

$$\mu_2 = \bar{C}_2 + \bar{S}_2 \times i$$

(Equação 21)

Caso a sequência de dados seja unimodal e a sua representação gráfica apresente um pico bem ajustado a uma distribuição normal, o valor da curtose circular será próximo de zero; caso a sequência de dados seja simétrica e unimodal, o valor da assimetria circular será próximo de zero.

4.9. Medidas de associação de dados direcionais

a) Correlação linear-circular

O coeficiente de correlação linear-circular, equação 22, é um critério importante, uma vez que permite determinar a existência de alguma associação entre duas variáveis (uma de natureza linear e outra de natureza circular). Pretende-se conhecer se as alterações no comportamento de uma das variáveis afetam ou são influenciadas pela outra variável. Para além de determinar a existência de qualquer tipo de associação entre as variáveis, este indicador estatístico tem como objetivo quantificar o grau de associação que liga os dois conjuntos de valores (Cohen *et al.*, 2003).

Neste caso específico da correlação linear-circular, equação 22, tem-se uma variável linear X , representativa dos pontos cardeais e colaterais, principais pontos de referência para a localização sobre a superfície terrestre, e uma variável circular θ representativa da inclinação das diáclases. Cada uma destas variáveis apresenta-se sob um conjunto de observações associadas $(X_1, \theta_1), (X_2, \theta_2), \dots, (X_n, \theta_n)$.

$$r_{x\theta}^2 = \frac{r_{xc}^2 + r_{xs}^2 - 2 \times r_{xc} \times r_{xs} \times r_{cs}}{1 - r_{cs}^2}$$

(Equação 22)

Onde:

$$\begin{aligned} r_{xc} &= \text{corr}[x_i, \cos(\theta_i)] \\ r_{xs} &= \text{corr}[x_i, \sin(\theta_i)] \\ r_{cs} &= \text{corr}[\cos(\theta_i), \sin(\theta_i)] \end{aligned}$$

A função *corr* aqui descrita trata-se da função correlação linear comum (coeficiente de Pearson). Os resultados da equação 22 encontram-se contidos no intervalo [0; 1]. Caso o valor obtido seja 0, implica que não existe qualquer tipo de associação entre variáveis; pelo contrario, quanto mais próximo o resultado se aproximar dos valores extremos, maior será a associação entre as variáveis, sendo ela positiva ou negativa, conforme o valor (Fiúza, 2003).

No caso específico deste trabalho, o coeficiente de correlação indica-nos a existência de algum tipo de associação entre as fraturas amostradas. Em caso afirmativo para a associação entre variáveis, indica-nos também o seu grau.

b) Correlação circular-circular

O coeficiente de correlação circular-circular permite estabelecer o grau de associação entre duas variáveis circulares, onde θ representa a direção e Φ representa a inclinação, para uma dada sequência de observações do tipo $(\theta_1, \phi_1), (\theta_2, \phi_2), \dots, (\theta_n, \phi_n)$.

Para o cálculo deste coeficiente, existem diversas fórmulas, pelo que nas equações 23 e 24 estão expressas duas das variadas possibilidades (Mardia e Jupp (2000)), respetivamente.

$$circular = \frac{\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} \sin(\theta_i - \theta_j) \sin(\phi_i - \phi_j)}{\sqrt{\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} \sin^2(\theta_i - \theta_j) \sum_{1 \leq i \leq j \leq n} \sin^2(\phi_i - \phi_j)}}$$

(Equação 23)

$$r^2 = \frac{[(r_{cc}^2 + r_{cs}^2 + r_{sc}^2 + r_{ss}^2) + 2(r_{cc}r_{ss} + r_{cs}r_{sc}) \times r_1r_2 - 2(r_{cc}r_{cs} + r_{sc}r_{ss})r_2 - 2(r_{cc}r_{sc} + r_{cs}r_{ss})r_1]}{[(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)]}$$

(Equação 24)

Onde:

$$\begin{aligned} r_{cc} &= \text{corr}(\cos \theta, \cos \varphi) \\ r_{cs} &= \text{corr}(\cos \theta, \sin \varphi) \\ r_{sc} &= \text{corr}(\sin \theta, \cos \varphi) \\ r_{ss} &= \text{corr}(\sin \theta, \sin \varphi) \\ r_1 &= \text{corr}(\cos \theta, \sin \theta) \\ r_2 &= \text{corr}(\cos \varphi, \sin \varphi) \end{aligned}$$

Os valores de r^2 são sensíveis a pequenas amostras, ou seja, em casos onde o número de medições é escasso, podendo levar a resultados errados. Os valores do coeficiente da correlação circular-circular estão contidos no intervalo [-1; 1], pelo que o valor 0 implicar não existir qualquer tipo de associação entre as duas variáveis. Nas figuras 31 e 32, encontra-se evidenciado a representação gráfica de dados com uma correlação circular-circular elevada e fraca, respetivamente.

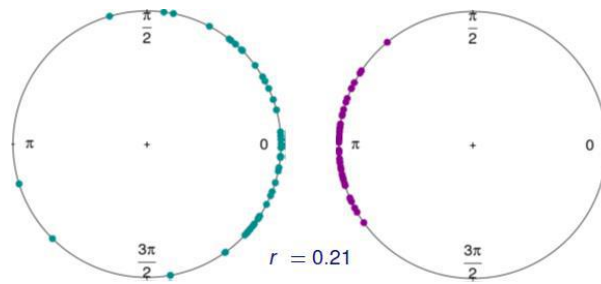


Figura 32 - Representação gráfica de dados com coeficiente de correlação circular-circular fraco (Barbosa, 2013).

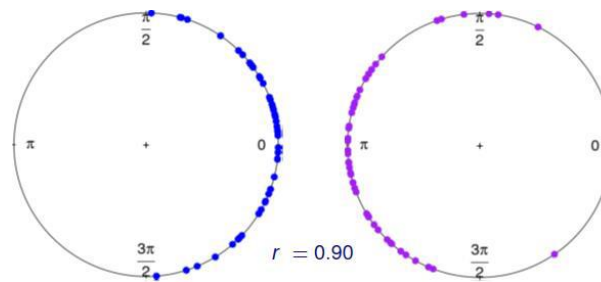


Figura 31 - Representação gráfica de dados com um coeficiente de correlação circular-circular elevado (Barbosa, 2013).

4.10. Inferência estatística

4.10.1. Testes paramétricos

Tal como na estatística clássica, na estatística circular também se efetuam teste de hipótese. Estes comportam-se como uma ferramenta que ajuda na tomada de decisões, tendo por base, os dados recolhidos. São numerosos os testes de hipótese, pelo que estes devem ser escolhidos com especial atenção e adequados ao trabalho em causa.

Os testes de hipótese estão divididos em duas categorias, os paramétricos e não paramétricos. Os testes paramétricos baseiam-se em medidas intervalares da variável dependente (um parâmetro quantitativo de uma população) e o uso destes testes exige que sejam cumpridos três pressupostos: distribuição normal, homogeneidade dos dados e variáveis intervalares e contínuas.

Assim, não devem ser aplicados os testes paramétricos quando os pressupostos não são cumpridos. O mesmo se aplica aos testes não paramétricos, ou seja, estes não devem ser utilizados quando existem condições necessárias ao uso dos testes paramétricos, dado que estes últimos são mais potentes (Fiúza, 2003).

a) Teste da uniformidade circular

Quando se trabalha com dados direcionais, surge uma questão muito comum, que se atribui com a necessidade de saber se uma amostra se encontra uniformemente distribuída ao longo do círculo (Carvalho, 2010). Assim, sobram apenas duas hipóteses:

H_0 : “A população está distribuída uniformemente em torno do círculo.”

H_1 : “A população não está distribuída uniformemente em torno do círculo.”

Como os dados são direcionais, o teste que se considera mais apropriado é o teste de Rayleigh, figura 33, que põe em causa o comprimento do vetor resultante, considerando uma distribuição não uniforme, com base no valor de Z , obtido através da equação 25.

$$Z = \bar{R}^2 \times n$$

(Equação 25)

Onde:

n – Número de observações.

\bar{R}^2 – Quadrado do comprimento do vetor médio.

À priori, um valor elevado de Z indica uma maior concentração de dados junto da média, o que infere uma menor probabilidade destes se encontrarem uniformemente distribuídos, e consequentemente rejeitar-se-ia a hipótese de H_0 . No entanto, o conceito de valor pequeno pode dar lugar a equívocos. Assim, o critério para a rejeição ou não rejeição de H_0 passa por determinar a probabilidade P e caso esta seja superior ao nível de significância estipulado, a hipótese H_0 não é rejeitada; caso contrário, a hipótese H_0 é rejeitada, e conclui-se que os dados apresentam evidências de uma direção preferencial (Barros, 2016; Carvalho, 2010; Davis, 2002).

O cálculo da probabilidade P (valores críticos de Z) é conseguido através da equação 26.

$$P = e^{\left| \sqrt{(1+4n+4(n^2-R^2))} - (1+2n) \right|}$$

(Equação 26)

A aplicação deste teste aos dados direcionais, nomeadamente, à direção e inclinação, permite saber se estas são aleatórias; ou seja, se existe alguma direção preferencial por parte da fraturação ou, caso contrário, se a probabilidade de fraturação é igual para todas as direções (Carvalho, 2010).

Torna-se importante alertar que este teste pressupõe que as amostras a serem testadas provem de uma distribuição de von Mises, abordada mais à frente.

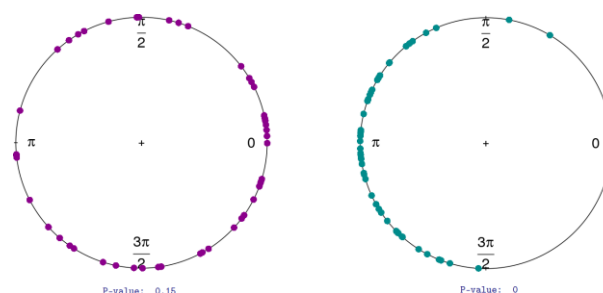


Figura 33 - Representação gráfica de resultados distintos do teste de Rayleigh (Barbosa, 2013).

É também ainda considerado o teste de afastamento de Rao, que usa a hipótese H_0 supracitada e pretende comparar a direção média (direção preferencial) ou a variância circular (dispersão) das duas amostras, com o intuito de se saber se provêm da mesma população, segundo a fórmula 27 - Figura 34.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left| T_i - \frac{2\pi}{n} \right|$$

(Equação 27)

$$T_i = \theta_i - \theta_{(i-1)}$$

com $i = 1, 2, \dots, n-1$

(Equação 28)

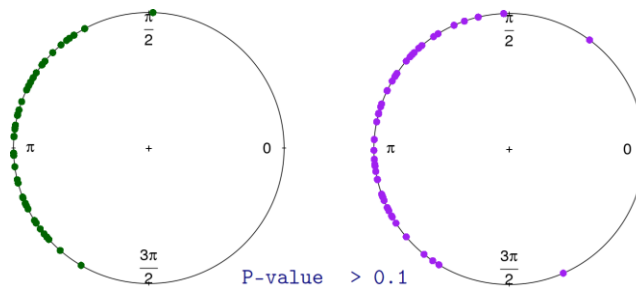


Figura 34 - representação gráfica de resultados distintos do teste de Rao (Barbosa, 2013).

Uma vez que se trata de uma distribuição uniforme, o espaçamento entre os dados deverá ser, de forma aproximada, $360^\circ/n$. Se se constatar que os valores verificados são muito diferentes do valor supracitado, então a probabilidade de os dados honrarem a hipótese nula é bastante reduzida (Barros, 2016; Góis, 2002).

b) Teste de tendência específica

Os testes de hipótese obrigam a inúmeros cálculos para saber se uma amostra foi ou não retirada de uma população que segue uma direção média específica (Davis, 2002).

Desta forma, surge a necessidade de encontrar testes mais simples. O teste de tendência específica é uma das escolhas, uma vez que permite responder a questões tais como “Será que as medições que se obtiveram possuem alguma ligação com os grandes cisalhamentos que rodeiam a zona onde foram recolhidos?” (Carvalho, 2010).

O primeiro passo para se efetuar este teste passa por determinar o intervalo de confiança junto da direção média e confirmar que este valor é satisfatoriamente grande para abranger a direção média calculada. O intervalo de confiança pode ser calculado pela equação 29, e fundamenta-se no erro padrão junto da direção média (equação 30), e deverá sempre ter em conta, tanto o tamanho da amostra como a sua dispersão (Davis, 2002).

$$\mu \pm z_{\alpha} s_e$$

(Equação 29)

$$s_e = \frac{1}{\sqrt{nR\kappa}}$$

(Equação 30)

Onde:

z_α – valor tabelado para um determinado nível de significância α , sendo que, normalmente, se adota o valor de $\alpha = 0,05$;

s_e – erro padrão da estimativa da direção média, tendo em conta o tamanho da amostra e a sua dispersão.

Considerando o interesse de dar resposta à pergunta anterior, faz-se uso deste teste sabendo-se que, se as direções médias calculadas estiverem entre o intervalo de confiança estabelecido, seguramente as fraturas estarão de alguma forma relacionadas com as grandes falhas que se verificam próximas da zona de Almeida, onde foram efetuadas as recolhas dos dados.

4.10.2. Testes não-paramétricos

a) Teste de Watson U_n^2

O teste de Watson tem por finalidade avaliar a qualidade ajustamento dos dados recolhidos à distribuição teórica de von Mises, podendo ser efetuado segundo a equação 31. Este teste apoia-se no cálculo da média do quadrado dos desvios entre uma distribuição empírica e uma distribuição teórica (Carvalho, 2010; Sá, 2007).

$$U_n^2 = \sum_{i=1}^n V_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)V_i}{n} + n \left[\frac{1}{3} - \left(\bar{V} - \frac{1}{2} \right)^2 \right]$$

(Equação 31)

Onde,

n – Valores ordenados por ordem crescente;

$V_i = F(\theta_i)$ – Valor da distribuição teórica;

\bar{V} – Média de V_i .

Para este teste, as hipóteses probabilísticas são:

- H_0 : A amostra tem origem numa distribuição de von Mises.
- H_1 : A amostra não tem origem numa distribuição de von Mises.

Quando se obtêm valores de U_n^2 elevados, ou seja, quando os desvios são altos, quer isto dizer que a probabilidade de os dados seguirem a lei de distribuição é baixa, e, portanto, rejeita-se a hipótese H_0 - Figura 35. Para este teste, existem, para diversos níveis de significância, valores críticos de U tabelados; nesta situação, se $U^2 < U_{crítico}$ a hipótese H_0 não é rejeitada (Carvalho, 2010; Sá, 2007).

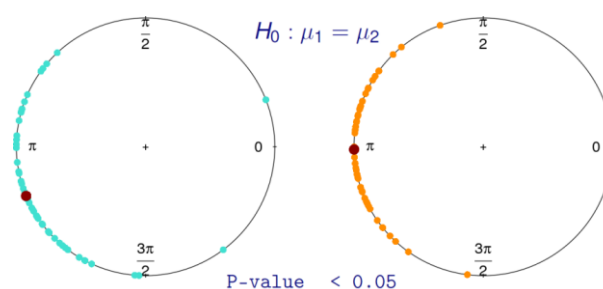


Figura 35 - Representação gráfica dos resultados do teste de Watson, onde se rejeita H_0 (Barbosa, 2013).

b) Teste de Kuiper V_n

Em alternativa ao teste de Watson, existe o teste de Kuiper, que compara de forma direta a distribuição dos dados, previamente ordenados. A comparação é efetuada com a distribuição da função teórica pretendida. Este teste é em tudo semelhante ao teste de Kolmogorov-Smirnov, da estatística linear, recaindo na análise dos desvios máximos positivos e negativos, D_n^+ e D_n^- respetivamente, entre a distribuição cumulativa empírica (equação 32) e teórica $F(\theta)$ (Carvalho, 2010; Mardia & Jupp, 2000).

$$S_n = \frac{i}{n} \text{ se } \theta_{(i)} \leq \theta \leq \theta_{(i+1)} \text{ com } i = 0, 1, \dots, n$$

(Equação 32)

Torna-se possível, depois de obtidas as distribuições empírica e teórica, determinar os desvios máximo e mínimo, conforme as equações 33 e 34.

$$D_n^+ = \max\{S_n(\theta) - F(\theta)\}$$

(Equação 33)

$$D_n^- = \max\{F(\theta) - S_n(\theta)\}$$

(Equação 34)

Se se definir V_n como a expressão 35, é possível comparar o valor conseguido com os valores críticos tabelados, conforme o nível de significância desejado. Assim, existem duas possibilidades para se decidir sobre a rejeição ou não rejeição de H_0 .

$$V_n = D_n^+ + D_n^-$$

(Equação 35)

Por comparação direta e se $V_n > V_{\text{crítico}}$, então a hipótese H_0 é rejeitada. Como alternativa, pode-se calcular a probabilidade associada a V_n , $P(V_n)$; caso esta probabilidade seja inferior ao α estipulado, a hipótese H_0 é rejeitada (Góis, 2002; Mardia & Jupp, 2000). Na figura 36, é possível observar-se a representação gráfica de resultados diferentes para o teste de Kuiper.

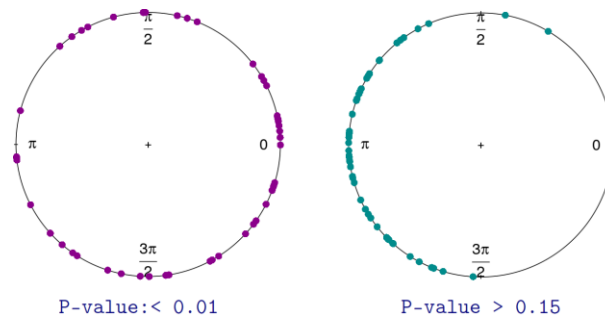


Figura 36 - Representação gráfica de resultados diferentes para o teste de Kuiper (Barbosa, 2013)

4.11. Modelo de distribuição de probabilidades

4.11.1. Distribuição de von Mises

A teoria das probabilidades, quando aplicada a dados circulares oferece alguns modelos de distribuição, que podem ser ajustados aos dados das variáveis, obtendo-se conclusões de especial interesse.

No seguimento desta dissertação, não foi aplicada de forma direta a distribuição de von Mises, mas considerou-se pertinente efetuar um breve esclarecimento, dado que esta distribuição é aplicada a alguns dos resultados obtidos pelo *software Oriana*.

A distribuição de von Mises, conhecida como a distribuição normal para dados direcionais, é a mais usada para a modelação de dados reais. Isto acontece devido às suas boas características, tais como a simetria, regularidade e parâmetros de fácil interpretação (Carvalho, 2010).

Neste caso em concreto, unicamente são precisos dois parâmetros para definir a distribuição, sendo eles a direção média μ e o parâmetro de concentração \hat{k} , calculados à priori. Trata-se assim de uma distribuição simétrica relativamente à média e unimodal. É conhecido antecipadamente que, conforme o parâmetro de concentração \hat{k} aumenta, a probabilidade da distribuição se concentrar junto média também aumenta. Na possibilidade de $\hat{k} = 0$, a probabilidade é igual qualquer que seja a direção e, portanto, origina uma distribuição circular uniforme (Carvalho, 2010).

Torna-se importante definir primeiramente, a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem 0, conforme a equação 36.

$$I_0(k) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{k \cos \theta} d\theta$$

(Equação 36)

Uma vez definida a função de Bessel, torna-se mais simples definir e compreender a própria função densidade de probabilidade de von Mises (equação 37). A distribuição de von Mises apresenta dificuldades ao nível do cálculo da sua função densidade; no entanto, e apesar da contrariedade, possibilita a determinação do seu valor por dois métodos diferente: pelos valores tabelados, ou então, através da aproximação à distribuição normal $N(u,k)$.

$$M_{\mu,k}(\theta) = \frac{1}{2\pi I_0(k)} \times e^{k \cos(\theta-\mu)}$$

(Equação 37)

Capítulo 5.

Caracterização da área de estudo

5. Caracterização da área de estudo

5.1. Enquadramento geográfico

A região alvo de estudo localiza-se na freguesia de Almeida, pertencente ao concelho com o mesmo nome, no distrito da Guarda - Figura 37.

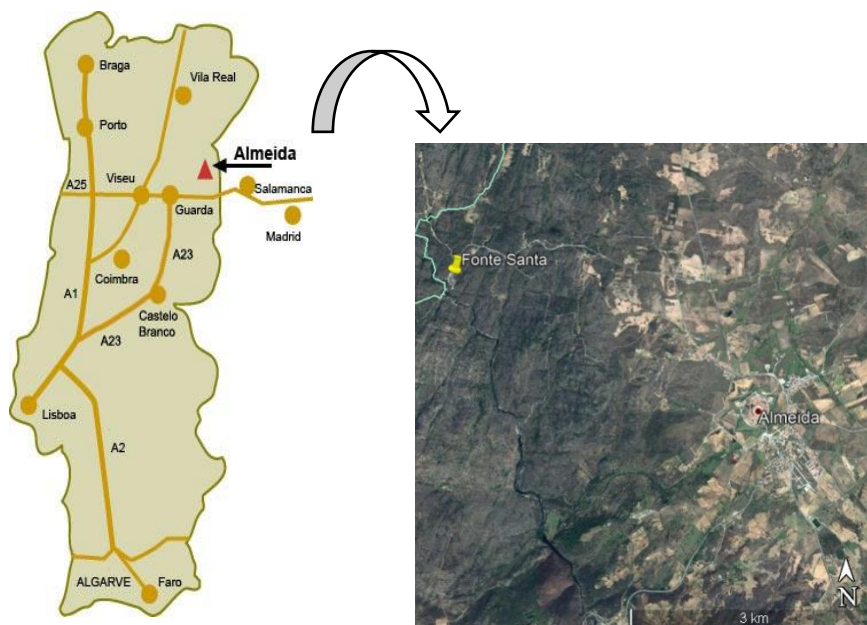


Figura 37 - Localização da área em estudo em Portugal Continental e em pormenor a zona em estudo, localizada com o nome Fonte Santa (Google Earth - 26/04/2017).

A área em causa encontra-se localizada na carta topográfica de Portugal, folha nº183, à escala 1:25000 dos Serviços Cartográficos do Exército (Teixeira *et al.*, 1959). O concelho de Almeida é sede de um município com cerca de 7242 habitantes e com 517,98 km² de acordo com os censos do Instituto Nacional de Estatística (2001), subdividido em 16 freguesias; já a freguesia de Almeida possui cerca de 1300 habitantes. O concelho de Almeida está inserido na região das Beiras, na sub-região da Beira Interior Norte - Beiras e Serra da Estrela. Este concelho, tal como os concelhos confinantes interiores, vê no setor primário a principal fonte de riqueza.

A área cartografada é atravessada, em toda a sua extensão, pelo rio Côa; é ainda atravessada por inúmeras estradas, dando-se destaque para a estrada internacional que da Guarda leva a Espanha, passando por Vilar Formoso.

5.1.1. Breve nota histórica sobre Almeida

Apesar de se verificar vestígios da presença humana desde o Paleolítico, é apenas na época medieval que se verifica a evolução de Almeida. Esta evolução fica a dever-se a dois fatores principais, a sua localização no limite das fronteiras portuguesas e a criação de concelhos, de maneira a garantir a colonização da fronteira. Almeida terá sido formada na migração dos habitantes de um castro lusitano e dada a sua localização num planalto, os árabes denominaram-na de Al-Mêda (a Mesa), Talmeyda ou Almeydan, onde ergueram, nos séculos VIII-IX um pequeno castelo (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

Em 1296, recebeu o foral por parte de D. Dinis. Em 1510, recebeu a mesma distinção de D. Manuel. O castelo, de planta retangular e com quatro torres circulares, viu nascer o núcleo medieval delimitado pelas muralhas e cujos vestígios ainda são visíveis na Porta do Sol. Foi também no castelo que existiu a primitiva Igreja Matriz (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

Ao longo da Guerra dos Setes Anos, no período 1756 a 1763, Almeida regressou aos domínios espanhóis, tendo sido reconquistada por Portugal em 1763 (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

Em 1810, despoletada pelas invasões francesas, decorreu a explosão do Revelim do Paiol, que levou à devastação de grande parte da vila. Esta praça defensiva tornou-se bastante importante, tendo levado ao prolongamento urbano e institucional, sendo exemplos da arquitetura do século XVI os edifícios do Tribunal, Igreja e Hospital da Misericórdia, o antigo Quartel de Artilharia, e a Vedoria (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

Aquando da Guerra Civil Portuguesa, o município foi apoiante de D. Miguel, entre 1829 e 1832, levando à nova destruição das muralhas - mais tarde, reconstruídas em 1853 (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

O rio Côa integra parte do concelho e, durante um longo período de tempo, foi sendo disputado entre Portugal e o reino de Leão, até que em 1927, pelo rei D. Dinis, com o tratado de Alcanizes, foi definido que as terras a Este do rio Côa passariam a fazer parte do território português (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

Um bom exemplo da arquitetura militar barroca é a Praça Forte de Almeida, construída nos séculos XVII/XVIII, sendo uma fortaleza em estrela hexagonal - Figura 38 (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

No ano de 1927, o último Esquadrão de Cavalaria deixou Almeida, perdendo a atividade militar, motivo fundamental da sua existência ao longo dos séculos (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).

O urbanismo que se verifica foi influenciado pela qualidade de praça-forte, com a existência de quarteirões com a finalidade de alojar os militares, como é o exemplo do antigo quartel da Cavalaria (Aldeias Históricas de Portugal, 2015).



Figura 38 - Fortaleza de Almeida, em forma de estrela hexagonal (Google Earth - 26/04/2017).

5.1.2. Enquadramento geotectónico e geomorfológico regional

O mapa geológico da região de Almeida está representado na folha 18-B, da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50000. A zona em questão encontra-se inserida numa vasta zona plana,

onde as altitudes podem variar, em média, entre os 750 metros e os 800 metros (Teixeira *et al.*, 1959).

A zona de Almeida enquadra-se na vasta superfície de erosão da Meseta Ibérica, onde a regularidade nesta área é apenas interrompida pelo profundo sulco do Vale do Côa, que a divide a meio, e também pelos vales mais ou menos abertos dos outros cursos de água, afluentes ou não do rio Côa e/ou do rio Águeda. Não é verificada a existência de qualquer relevo que perturbe a uniformidade desta mesma superfície, dentro dos limites do mapa geológico (Teixeira *et al.*, 1959).

O Rio Côa corre, segundo a direção Sul - Norte, nas profundezas de um vale muito estreito, cerca de 150 a 200 metros de profundidade relativamente à plataforma em que se encontra inserido, verificando-se uma inclinação do leito bastante reduzida; ao longo de mais de 20 quilómetros, apenas se verifica um desnível de 100 metros.

Existe uma mudança geral dos cursos de água, que importa ressaltar: na zona meridional da carta militar referida anteriormente, os cursos de água apresentam-se, quase sempre, orientados para NNE-SSW, pelo que na região setentrional, os cursos assumem o rumo NNW. As explicações para este fenómeno são escassas, sendo que no primeiro caso é possível invocar-se influências estruturais; já para o segundo percurso, verifica-se alguma dificuldade em encontrar-se razões similares.

No que diz respeito à geologia envolvente, a região de Almeida é essencialmente granítica. Meramente na zona de fronteira, é possível encontrar-se duas pequenas manchas de xisto e nas imediações de Almeida, é possível ver algumas formações xisto-migmatíticas. Regra geral, estas formações são cortadas por inúmeros filões de diversas composições, nomeadamente, quartzíticas, pegmatíticas ou aplíticas, ou até mesmo básicas.

Na região de Almeida, é possível distinguir-se diversas unidades geológicas, entre as quais, Figura 39 (Teixeira *et al.*, 1959):

- i. Terrenos modernos de cobertura (ceno-antropozoicos):
 - a. Formações aluviais;
 - b. Depósitos arcósico-argilosos e cascalheiras (Depósito de Vilar Formoso);
- ii. Rochas do soco antigo (ante-mesozóicas):
 - a. Xistos metamórficos de Vale de la Mula;
 - b. Complexo xisto-migmatítico de Almeida;
 - c. Granitos;
- iii. Filões:
 - a. Filões aplíticos;
 - b. Filões de quartzo;
 - c. Filões de rochas básicas.

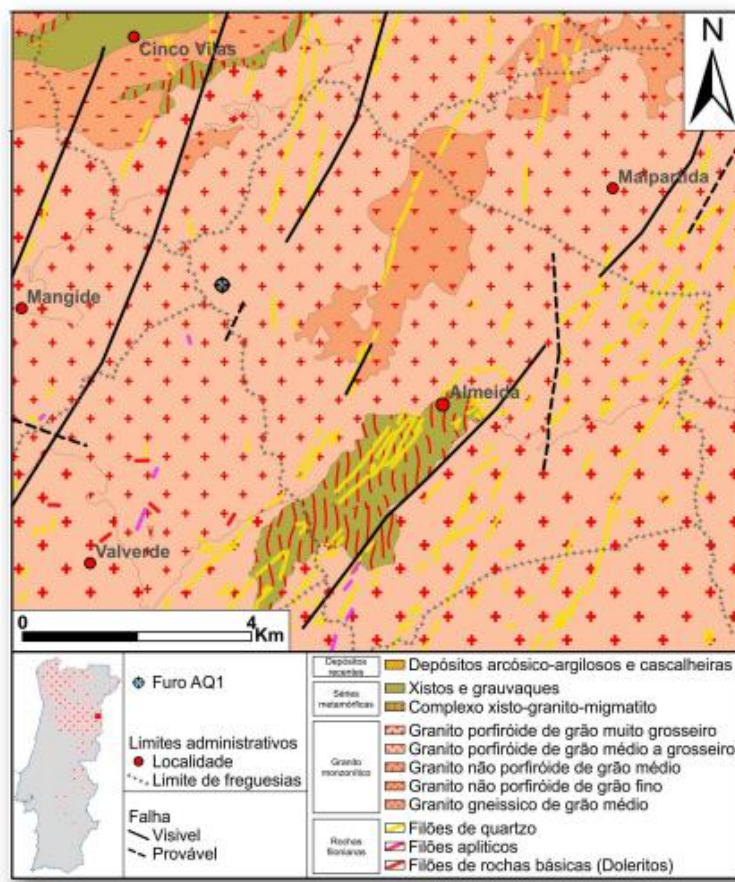


Figura 39 - Localização geográfica e contexto geológico do local de estudo com indicação da localização do furo AQ1 pertencentes às termas de Almeida (Miranda *et al.*, 2016)

O vasto maciço rígido sofreu fraturas e foi dividido por uma estreita rede de diáclases e falhas, onde se foram instalando filões de distinta natureza, graças ao crescimento de tensões internas ao longo e após a consolidação, mas principalmente, pelas posteriores forças compressivas externas que o maciço foi alvo.

Em Almeida, os filões encontrados são essencialmente quartzíticos, aplíticos e de rochas básicas. Os filões quartzíticos são de elevado número e a sua orientação é, aparentemente, NNE, bem assinalada em toda a região da Beira. Pelo oposto, os filões de rochas básicas são poucos e seguem, aparentemente, quer a direção anterior referida como a direção NW-SE ou E-W. Relativamente aos filões aplíticos e ainda os filões quartzo-pegmatíticos mineralizados pela volframite, estes aparentam a orientação predominante para NE ou ENE (Teixeira *et al.*, 1959).

Quanto à idade dos mesmos, os mais antigos são considerados os filões quartzo-pegmatítico, dado que a fase pegmatítica se encontra relacionada com granitização varisca. Os mais recentes podem considerar-se os filões de quartzo leitoso.

Os referidos filões demonstram indícios de reabertura das fraturas onde se encontram encaixados, e são cortados por pequenas falhas, com orientação geral de NW-SE (Teixeira *et al.*, 1959).

Quanto ao rio Côa, o percurso deste pode ser, em parte, de origem epigenética, realçando que a partir do Vale das Figueiras, verifica-se uma mudança de orientação, passando a ser perpendicular à direção tectónica principal. No entanto, a presença de nascentes de águas

sulfurosas, como é o caso de Fonte Santa e a sua mesma situação no fundo do vale do Côa, pode ser indicador que o mesmo se encontra relacionado com uma ou mais linhas de fraturas.

5.1.3. Explorações minerais

São diversos os locais que, outrora, foram alvo de explorações minerais, verificando-se uma maior intensidade junto das freguesias de Almeida e Vilar Formoso, podendo ajudar a explicar a mineralização do recurso hídrico em estudo. Os principais minérios extraídos nesta região correspondiam à volframite e à cassiterite.

A volframite aparece nos filões quartzíticos ou pegmatíticos, sendo que os de maior relevância foram explorados nas concessões de Atalaia e Folha de Atalaia, localizadas a SW da freguesia de Vilar Formoso. Estes filões, que são simultaneamente estaníferos, encontram-se direccionados para N 60° a 65° E. Localizado a Sul de Freineda, e igualmente mineralizado por volframite, encontra-se o filão aplítico, de forte exploração ao longo da segunda guerra mundial e de orientação NE-SW (N° 40E) (Teixeira *et al.*, 1959).

A cassiterite foi explorada em aluviões, para além dos jazigos filonianos encontrados em Vilar Formoso.

Verificou-se também a presença de ilmenite, autunite, torbenite e uranocircite. Os três últimos referidos são minerais acessórios do urânio e ocorreram em diversos locais, quer impregnados nos granitos arenizados, quer em pequenas fraturas da mesma rocha ou ainda nos encostos dos filões.

5.1.4. Caracterização climática

Devido à escassez das chuvas nesta região, as condições hidrológicas são, de uma forma generalizada, más. Uma observação atenta às normais climatológicas (ainda que provisórias do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2017)) relativos ao distrito da Guarda, entre o período 1981 e 2010, revelam um valor da média da quantidade total significativamente mais baixo - Figura 40.

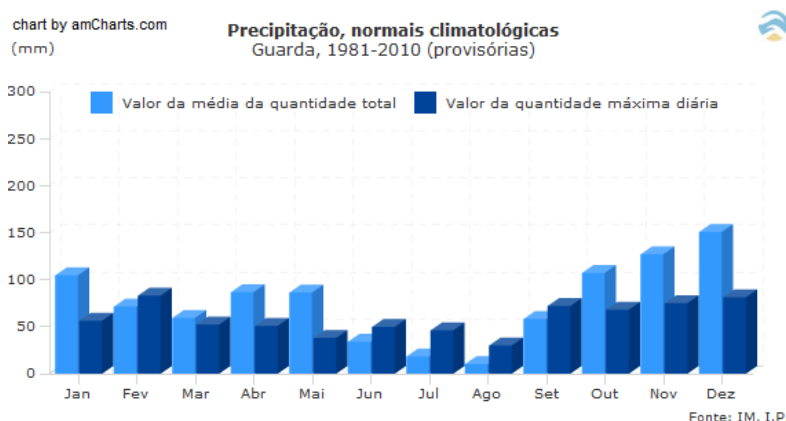


Figura 40 - Normais climatológicas referentes à precipitação no distrito da Guarda desde 1981 a 2010 (IPMA, 1/04/2017).

A precipitação varia entre um máximo de 150,6 mm para o mês de dezembro, relativamente ao valor da média da quantidade total, e um mínimo de 10,4 mm no mês de agosto. Já para o valor da quantidade máxima diária registado, este apresentou um máximo de 81,2 mm para o mês de dezembro e um mínimo de 30,2 mm para o mês de agosto, no período entre 1981-2010.

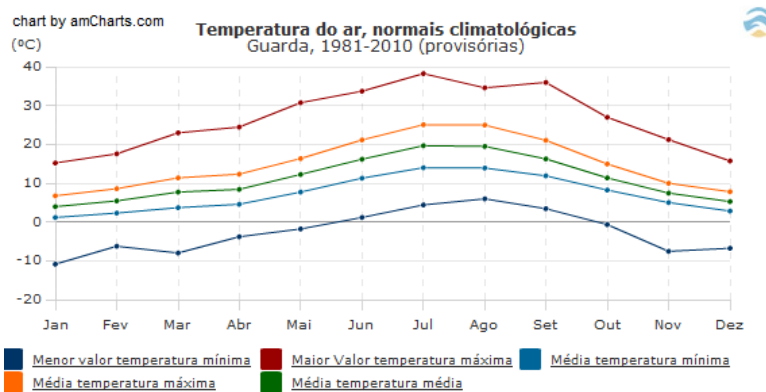


Figura 41 - Normais climatológicas referentes à temperatura do ar no distrito da Guarda desde 1981 a 2010 (IPMA, 1/04/2017).

Relativamente à temperatura do ar, figura 41, esta atinge o pico máximo do maior valor da temperatura máxima no mês de julho, com o valor de 38,3°C; quanto ao menor valor da temperatura mínima, é registada em janeiro, com o valor de -10,8°C. A média da temperatura máxima tem o seu valor mais alto no mês de julho com 25,1°C e o menor valor registado em dezembro, com 7,8°C. A média temperatura mínima tem o seu menor valor em janeiro com 1,2°C, e o seu maior valor é registado em julho com 14°C.

5.1.5. Fonte Santa - local de estudo

Seguindo para NW de Almeida, a cerca de 3,5 km, no vale do Côa, verifica-se a existência de uma fonte de águas minerais, fracamente mineralizada, sulfúrea, bicarbonatada e sódica, designada por Fonte Santa - Figura 42.

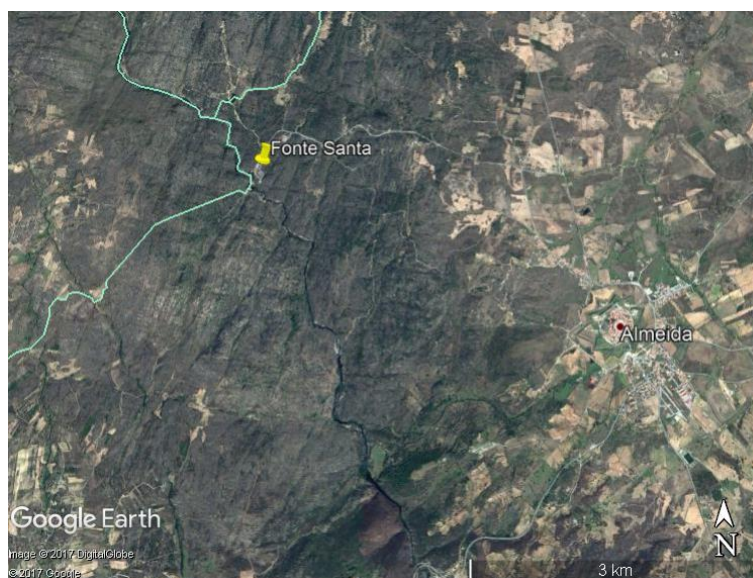


Figura 42 - Localização de Fonte Santa, local de alvo de estudo (Google Earth - 25/04/2017).

As termas encontram-se concessionadas à Câmara Municipal de Almeida, figura 43, desde 10 de janeiro de 1992. Apresenta uma área de 86 hectares, estando o seu perímetro de proteção estabelecido na portaria nº 119/2016 de 2 de maio de 2016.



Figura 43 - Centro termal de Fonte Santa.

As termas estão inseridas num vasto afloramento granítico, de idade posterior ao Estefaniano Médio, fazendo parte do batólito granítico das Beiras. Na região, subsiste o predomínio de dois sistemas de falhas orientadas, respetivamente, a NNE-SSW e WNW-ESE, cortados um pelos outros, de forma transversal, resultando em linhas tectónicas visíveis, formando uma espécie de “malha”. Com recurso ao método da fotografia aérea e a imagens de satélite, figura 44, é possível confirmar estes sistemas de falhas e o incrível encaixe do Rio Côa no maciço - Figura 45. Na figura 44, é possível constatar que perto de Fonte Santa, o traçado do rio apresenta-se mais sinuoso, denunciando uma maior tectonização dessa mesma área, com rejeitos de falhas, sendo isto confirmado pela tectonização da área onde circula a água mineral (Cortez, 2013).

É verificado, ao longo das superfícies dos planaltos, a existência de diversas linhas de água, que promovem a rede de diáclases, que escorrem de forma perpendicular ao rio Côa (Gama *et al.*, 2010).

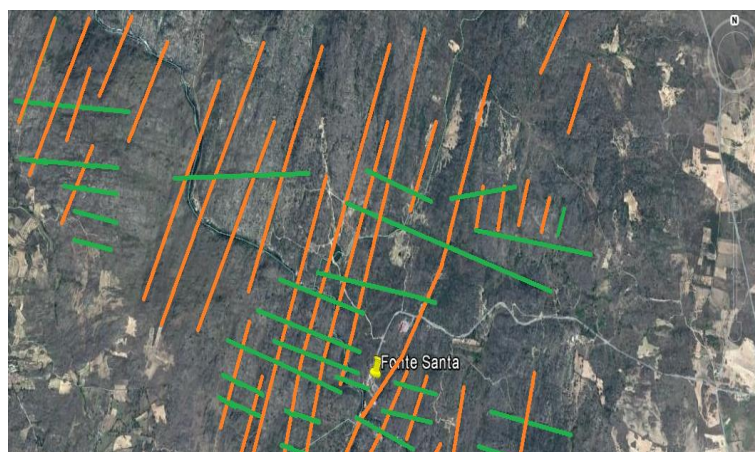


Figura 44 - Imagem de satélite do local alvo de estudo, com destaque para os sistemas de falhas: a laranja encontra-se evidenciado o sistema de falhas NNE-SSW e a verde, o sistema WNW-ESE (Google Earth - 27/04/2017).

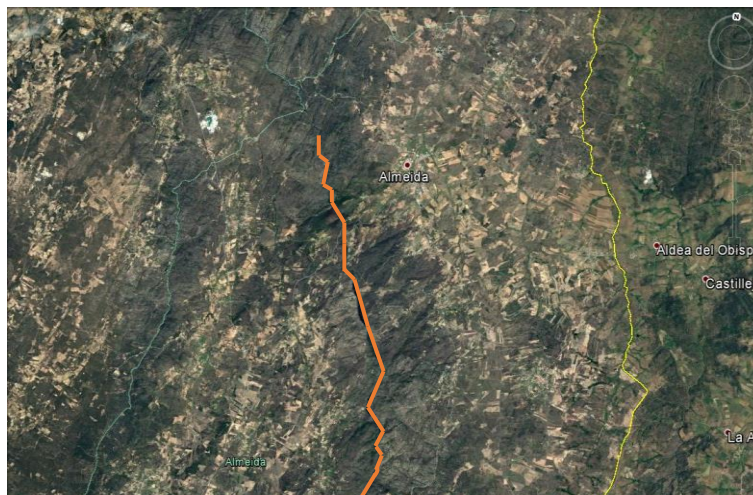


Figura 45 - Pormenor do Rio Côa encaixado no vale fraturado. A laranja encontra-se evidenciado o encaixe do Rio Côa e a amarelo a fronteira com Espanha. (Google Earth - 27/04/2017).

Importa realçar o sistema de falhas onde se encontra encaixado o Rio Côa, que segue as direções regionais predominantes.

O sistema orientado a NNE-SSW merece especial destaque, uma vez que nessa mesma orientação, distingue-se uma falha, onde o prolongamento, na mesma direção, passaria a sul da emergência das águas termais (Teixeira *et al.*, 1959).

A nível mineralógico e litológico, a região onde acontecem as emergências da Fonte Santa é caracterizada por apresentar uma elevada homogeneidade, sendo composta por granito de grão grosseiro, de tonalidade azulada, porfiroide, e apresentando megacristais de feldspato; verifica-se uma predominância da biotite, estando também presente a moscovite. A típica cor branca dos feldspatos, pela meteorização, passa a rosa ou até mesmo com nuances amarelas. Na mesma região, é possível ainda encontrar granito de grão médio a fino, sendo a sua composição mineralógica idêntica aos granitos de grão grosseiro. A presença dos feldspatos calcoessódicos coloca estas rochas na categoria dos granitos monzoníticos.

Martins Carvalho (1979), considera que a existência de uma nascente de águas sulfúreas, no fundo do vale, demonstra que o rio Côa se encontra ligado a uma ou mais fraturas. Assim, é plausível considerar que a principal responsável pela emergência das águas desta fonte é, muito provavelmente, a visível extensa rede de diaclasamento.

Na margem direita do rio Côa, verifica-se, supostamente, uma zona mais tectonizada, e deprimida topograficamente, orientada para NE, terminando em bisel a SE, precisamente na Fonte Santa. Ainda nesta margem, são visíveis dois alinhamentos bem delimitados, um muito próximo de N-S e outro de orientação WNW-ESE (Teixeira *et al.*, 1959).

A água mineral da Fonte Santa é captada por dois furos profundos - FS2 e AQ1. Atualmente, o abastecimento ao balneário é efetuado através do furo AQ1 (Cortez, 2013).

O modelo hidrogeológico do aquífero da Fonte Santa, figura 46, é composto pelas seguintes informações (Cortez, 2013):

- Infiltração de águas meteóricas ao longo de uma extensa zona aplanada;
- Descida em profundidade elevada até aos 3 - 4 km;
- Mistura com fluidos hidrotermais;
- Circulação nos granitos e ao longo da zona tectonizada, particularmente, na falha principal, de orientação NNE-SSW e inclinação subvertical;
- Tempo de residência elevado;

- Ascensão ao longo desta mesma estrutura, possivelmente armadilhada pela família de diáclases perpendicular aquela;
- O aquífero mineral não artesia, pelo que o seu nível hidroestático é próximo dos -7,30 metros perto da boca do furo FS2 e -32,75 metros junto do AQ1.

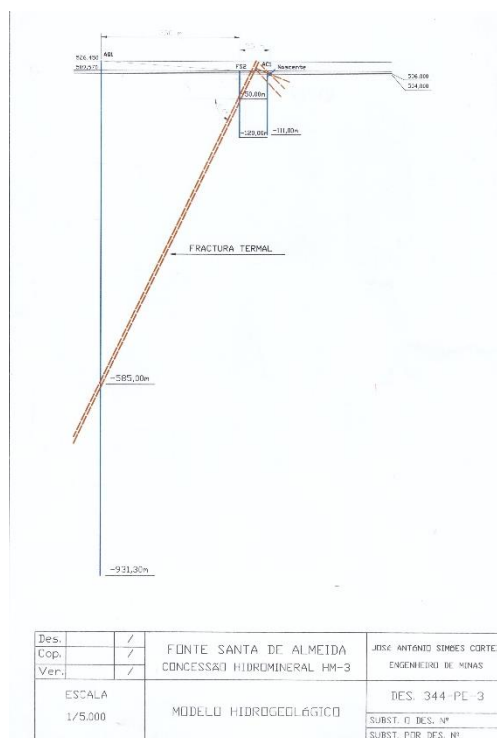


Figura 46 - Modelo hidrogeológico (Cortez, 2013).

Considerando as características da região já descritas, é admissível considerar que a recarga do aquífero é efetuada nas zonas onde o granito se encontra mais alterado, nas zonas de contacto e ainda em zonas de forte diaclasamento ou inclusive falhas. A rede de diáclases, os contactos geológicos, falhas e até mesmo filões, são estruturas que condicionam a circulação da água, ora funcionando como zona de barragem, ora funcionando como caminho preferencial de percolação. É possível localizar pequenos pontos com condições de boa permeabilidade, perfeitamente alimentados, nomeadamente, pequenas coberturas detríticas, junto das zonas mais próximas do rio.

Com a exceção das zonas aluvionares, onde é admitida a existência de condições ideais para a recarga lateral, a alimentação ao aquífero é insuficiente. O aparecimento das águas está situado numa depressão, de orientação NE, na vertente E; esta depressão pode corresponder a uma área tectonizada e que se encontra coberta por depósitos colúvio-aluvionares parcamente densos.

Segundo o modelo hidrogeológico, podem ser encontradas as seguintes famílias de diáclases:

- N78°W/82°N
- N13.5°E/Vertical
- N44.5°E/54°NW

Para além destas famílias, é ainda possível encontrar um sistema subhorizontal, do qual não foi possível a recolha de diáclases devido às condições do terreno.

5.1.6. Caracterização da fraturação local

O trabalho de campo foi efetuado de 10 a 12 de abril de 2017, estando o tempo quente e seco, não se registando qualquer ocorrência de chuva.

Durante o trabalho de campo, o local de estudo foi dividido em diversas zonas para uma melhor compreensão das características do terreno e para que se pudesse registar o máximo de informação - Figura 47. Tentou-se aplicar a metodologia de scanline, embora esta foi limitada pela presença de vegetação e afloramentos.

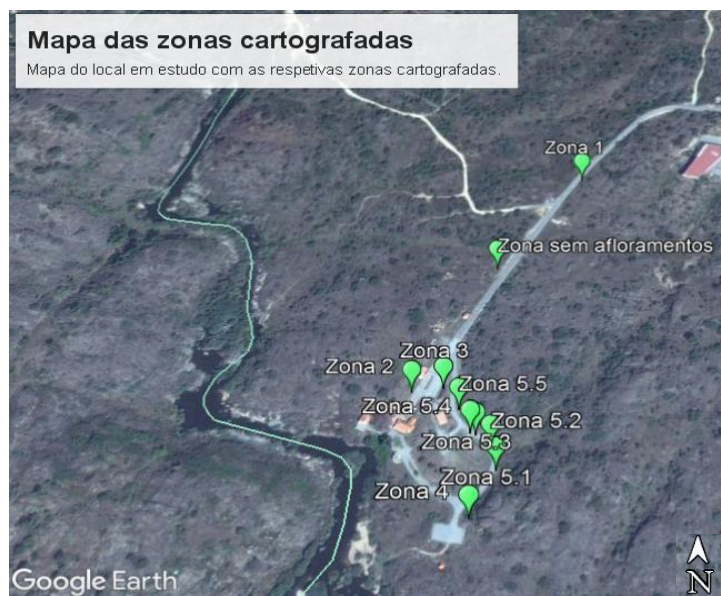


Figura 47 - Mapa do local de estudo com as respetivas zonas cartografadas (Google Earth, 27/04/2017).

a) Zona 1

O afloramento granítico observado na zona 1, é definido espacialmente pelas coordenadas GPS (40,7612°N, 6,95073°W). A análise foi efetuada no sentido Norte para Sul, durante o período da manhã. Numa primeira análise, o afloramento caracteriza-se por apresentar blocos de grandes dimensões, de aspeto arredondado e com a abundante presença da vegetação autóctone - Figura 48.

De forma mais detalhada, é possível compreender que o granito em causa se apresenta, sem presença de água visível ou seco, mas com vestígios da mesma, uma vez que possui elevadas quantidades de musgo entre as diáclases. Estas caracterizam-se por serem bastante rugosas, entre R₄₋₅, classe VII, encontrando-se fechadas ou com aberturas entre os 4 mm a 15 mm, ou seja, descontinuidades entreabertas a abertas. No que diz respeito à continuidade, esta apresenta-se baixa a média, com valores na ordem dos 3 a 5 metros.



Figura 48 - Vista geral zona 1.

O espaçamento entre diáclases é variável, podendo ir até aos 45 cm entre as mesmas, e até 13 metros desde a primeira diáclase medida.

Relativamente ao seu estado de alteração, o afloramento granítico encontra-se em diversos estádios, desde W_1 até W_4 .

O afloramento encontra-se coberto por uma capa de alteração, o que lhe confere uma coloração escura, e também pela presença de vegetação que se verifica abundante - Figura 49.



Figura 49 - Afloramento granítico evidenciando o seu estado de alteração e preenchimento das diáclases com musgo e vegetação.

É também ainda visível a presença de alguns fungos (líquenes), que recobrem o afloramento granítico. De realçar que os blocos de apresentam com formas arredondadas - Figura 50. No geral, verifica-se uma descompressão no sentido oeste.



Figura 50 - Pormenor do afloramento granítico com evidências da presença de fungos e da alteração superficial. Presença de vegetação abundante.

b) Zona sem afloramentos

Caminhando para sul, encontra-se uma zona praticamente plana, com as coordenadas GPS (40,74539°N; 6,95348°W). Numa primeira avaliação, esta zona é caracterizada pela aparente falta de afloramentos rochosos e pela extensa ocupação do território por parte da vegetação autóctone - Figura 51. Numa perspetiva mais atenta, verifica-se que existem alguns afloramentos, muito escassos, onde é impossível medir qualquer diaclasamento.



Figura 51 - Vista geral da zona sem afloramentos, com destaque para a abundância da vegetação autóctone.

Os poucos afloramentos existentes encontram-se bastante alterados, estando grande parte da rocha encontrada em estado de saibro, ou seja, estágio de alteração W_{5-6} - Figura 52. Não verificam sinais de oxidação. Existe uma forte possibilidade de os afloramentos se encontrarem remexidos, justamente pela forte presença da vegetação, que ocupa grande parte da zona.



Figura 52 - Pormenor da rocha alterada, já em saibro, estágio de alteração W_{5-6} .

c) Zona 2

Avançando cada vez mais para sul, encontra-se uma zona com um afloramento granítico bastante extenso, figura 44, de coordenadas GPS (40,74304° N; 6,95320° W). Numa primeira fase, verifica-se que se trata de um talude com diferentes estados de alteração, e onde a presença de vegetação se verifica abundante.

Numa análise mais detalhada, confirma-se os diversos tipos de alteração efetuada num primeiro momento. No início do aforamento, a alteração não é tão possante, e conforme se caminha em direção ao rio, para sul, nota-se de forma clara, um estado de alteração completamente superior, e com uma maior presença da vegetação rasteira - Figura 53.



Figura 53 - Panorâmica da zona 2. Enfase para mais de um grau de alteração presente.

Relativamente às diáclases, estas apresentam-se secas, apresentando evidências de processos metassomáticos, sendo essa presença denunciada pela coloração rosa que o afloramento apresentava em algumas zonas - Figura 54.



Figura 54 - Pormenor da coloração rosa do granito, devido aos processos metassomáticos.

Na sua grande maioria, o maciço apresenta-se de cor clara, com a exceção do exemplo dado anteriormente, e da capa de oxidação que recobre algumas paredes das diáclases, denunciando processos de oxidação - Figura 55.



Figura 55 - Pormenor de capa de oxidação férrica na parede de uma diáclase.

Ainda neste afloramento, é visível um filão de quartzo, de espessura de 2 centímetros. Para além disso, é evidente processo de *creeping*, junto de uma zona de esmagamento - Figura 56.

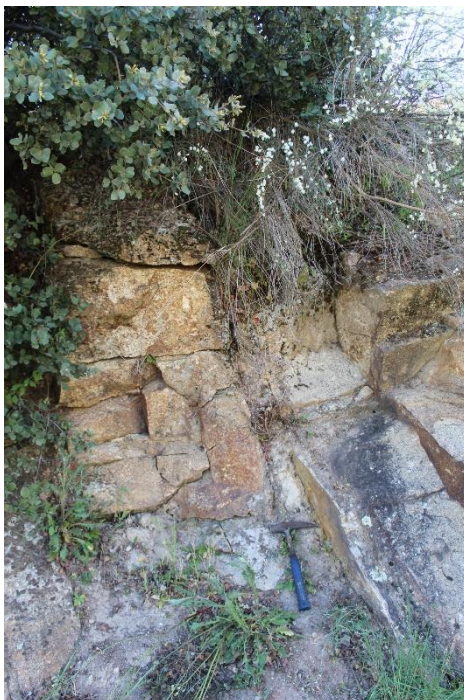


Figura 56 - Pormenor da evidência de *creeping*, junto de uma zona de esmagamento.

Aproximando-se para sul, verifica-se uma maior presença de líquenes na superfície da rocha - Figura 57. Relativamente à abertura das diáclases, estas possuem uma abertura na ordem dos 3 a 5 mm, sendo, no entanto, possível encontrar algumas completamente fechadas. O preenchimento é variado e feito por musgo, rocha, minerais de argila ou grãos de quartzo.



Figura 57 - Pormenor da presença de líquenes na rocha.

O espaçamento entre fraturas é muito variável, podendo ir desde os 12 cm até aos 130 cm, sendo predominante o espaçamento na ordem dos 50 cm, ou seja, verifica-se o predomínio de diáclases mediantemente afastadas.

Quanto à sua rugosidade, o afloramento apresenta-se muito diferenciado. Se na zona norte do afloramento, a rugosidade é de grau R_3 , classes V e VI, na zona sul, a rugosidade altera e passa a ser de R_{1-2} , classe I e II.

No que à continuidade diz respeito, esta apresenta-se baixa, com cerca de 2 a 3 metros, terminando assim que chegam ao solo, denunciando uma possível continuidade em profundidade.

d) Zona 3

A zona 3 tem início no local de coordenadas GPS (40,74325° N; 6,95285° W), figura 58, junto ao furo FS2. Numa primeira fase, o afloramento é caracterizado por apresentar diversos graus de alteração.



Figura 58 - Vista panorâmica da zona 3.

O afloramento granítico apresenta graus de alteração diferentes, entre W_2 e W_4 . Constata-se frequentemente a presença de óxidos de ferro, indicando a presença de água, apesar de todas as diáclases, neste afloramento, se encontrarem secas. Evidenciam-se processos de caulinição em algumas diáclases - Figura 59 - sendo ainda visível o espaçamento entre F_1 e F_3 entre fraturas, dado que pode atingir os 2,65 metros, bem como a presença da vegetação.



Relativamente à abertura entre diáclases, estas podem encontrar-se completamente fechadas, ou com aberturas entre os 2 centímetros e os 5 centímetros. Quando abertas, encontram-se, maioritariamente, preenchidas por musgo - Figura 60.

Figura 59 - Parede já alterada, com presença de vegetação e espaçamento entre fraturas elevado.



Figura 60 - Pormenor do preenchimento de uma diáclase por musgo.

Em termos de continuidade, verifica-se uma continuidade baixa, com persistências de cerca de 1 metro - Figura 61. Quanto à rugosidade, afloramento encontra-se entre R_3 , classe VI, e $R_{4.5}$, classe VIII.



Figura 61 - Evidência da continuidade de uma diáclase.

e) Zona 4

A zona 4 tem início no local de coordenadas GPS (40,74144° N; 6,95243° W), figura 62. Numa primeira análise constata-se a forte presença da vegetação, e os diferentes graus de alteração do afloramento, possuindo blocos de elevadas dimensões e de aspeto arredondado.

WWN



EES



Figura 62 - Panorâmica da zona 4.

Num olhar mais atento, verifica-se que se trata de uma zona preferencial de circulação de águas, dado que as diáclases se encontram húmidas e com vestígios de água, e confirmam-se os blocos de elevadas dimensões e arredondados - Figura 63. No que diz respeito ao seu grau de alteração, pode-se verificar que o afloramento se encontra entre os estádios W_2 a W_4 , com a presença de óxidos de ferro e com a alteração do feldspato.



Figura 63 - Evidências do afloramento fraturado e de elevada continuidade, com destaque ainda para a presença da vegetação.

Relativamente à sua rugosidade, esta encontra-se nos estádios R_{4-5} , classes VII e VIII.

Quanto ao seu estado de fraturação, o afloramento encontra-se em duas fases: se numa determinada parte do afloramento, este se encontra muito fraturado a medianamente fraturado, estando por isso, entre F_3 e F_4 , noutro lado, existem partes do afloramento que encontram nos estádios F_3 e F_2 . Na figura 64, é possível comprovar os estádios de fraturação F_3 e F_4 e ainda verificar a continuidade das diáclases, que encontram entre os estádios baixo a médio. Esta zona é ainda caracterizada por apresentar zonas de esmagamento, podendo chegar aos 11 centímetros de rocha esmagada.



Figura 64 - Blocos de aspeto arredondado. Presença da vegetação.

f) Zona 5

Devido à elevada extensão do afloramento, este foi subdividido em 5 zonas mais pequenas. O critério utilizado foi a existência de zonas bastante alteradas e cobertas por vegetação que impossibilitavam a medição de diáclases.

i. Zona 5.1

A zona 5.1 é caracterizada por pouca recolha de dados, uma vez que o afloramento aí encontrado se encontrava muito alterado, tendo início no local de coordenadas GPS (40,74306° N; 6,95322° W). É esta zona que merece mais reservas nas interpretações e conclusões dos resultados. Verifica-se a abundância da vegetação autóctone, e blocos de reduzidas dimensões, figura 65.



Figura 65 - Vista geral da zona 5.1.

O grau de alteração encontra-se entre os estádios W_3 - W_4 . As diáclases encontram-se abertas, com alguns centímetros, e preenchidas por musgo - Figura 66.



Figura 66 - Pormenor de bloco de pequenas dimensões alterado e com presença de vegetação abundante.

A continuidade é classificada como baixa, chegando aos 2 metros de extensão visível. Relativamente ao grau de fraturação, o afloramento encontra-se entre os estádios F_2 e F_3 . Não

se verifica a presença de água, embora se encontre vestígios da mesma - musgo. Quanto à rugosidade, estas encontram-se no estágio $R_{4.5}$, classes VIII e IX.

ii. Zona 5.2

Na zona 5.2 tem como coordenadas GPS (40,74299 N; 6,95272 W), sendo que não foi possível cartografar qualquer diáclase, uma vez que o afloramento se encontra extremamente alterado, W_4 , e completamente coberto por vegetação autóctone - Figura 67.



Figura 67 - Vista panorâmica da zona 5.2.

iii. Zona 5.3

A zona 5.3 apresenta-se definida espacialmente pelas coordenadas de GPS (40,74144 N; 6,65243 W). Numa primeira análise, esta zona apresenta-se com blocos com duas cores diferentes, presença de vegetação autóctone abundante e alterada - Figura 68.



Figura 68 - Vista panorâmica da zona 5.3.

Numa análise mais pormenorizada, verifica-se que o afloramento se encontra em diversos estádios no que diz respeito ao grau de alteração, entre W_3 a W_4 . No que diz respeito ao grau de fraturação, o afloramento encontra-se nos estádios F_3 a F_4 , com espaçamento entre fraturas na ordem dos 20 a 30 centímetros. As diáclases encontram-se fechadas, ou quando aberturas de escassos milímetros, preenchidas por minerais de argila.

Nota-se também vestígios da presença de água, embora as diáclases se encontrem secas, devido à oxidação férrica encontrada. Relativamente à continuidade, esta apresenta valores na ordem de 1 metro, estando assim classificado com continuidade baixa.

Confirma-se o detalhe da coloração verificado nas considerações iniciais. Um mesmo bloco apresenta uma dualidade de cor, sendo que no interior, apresenta-se com clara e nas extremidades, apresenta-se com uma coloração rósea/amarelada - Figura 69.

Isto acontece devido aos processos metassomáticos que ocorreram na região. No que diz respeito à rugosidade, as diáclases encontram-se no estágio R_3 , classe V. A continuidade verificada é baixa, estando na ordem dos 2 metros de extensão.



Figura 69 - Pormenor de bloco com dualidade de cores devido aos processos metassomáticos ocorridos na região.

iv. Zona 5.4

Na zona 5.4 é definida espacialmente pelas coordenadas GPS (40,74268 N; 6,95265 W), pelo que não foi possível cartografar qualquer diáclase, uma vez que o afloramento já se encontra no estado de caos de blocos e completamente coberto por vegetação autóctone, Figura 70.

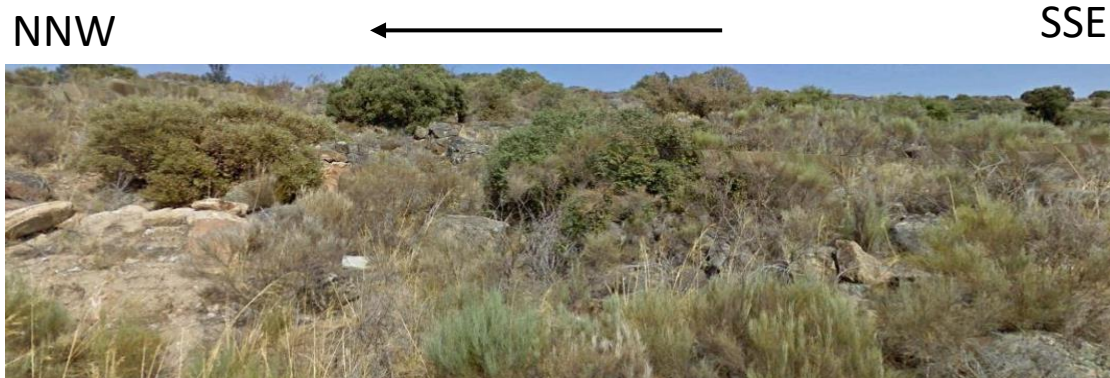


Figura 70 - Vista panorâmica da zona 5.4.

v. Zona 5.5

O afloramento granítico observado na zona 5.5, é definido espacialmente pelas coordenadas GPS (40,74292°N; 6,95278°W). A análise foi efetuada no sentido de Sul para Norte, figura 71. Numa primeira observação, verifica-se que o afloramento se encontra bastante fraturado e com a presença da vegetação autóctone.

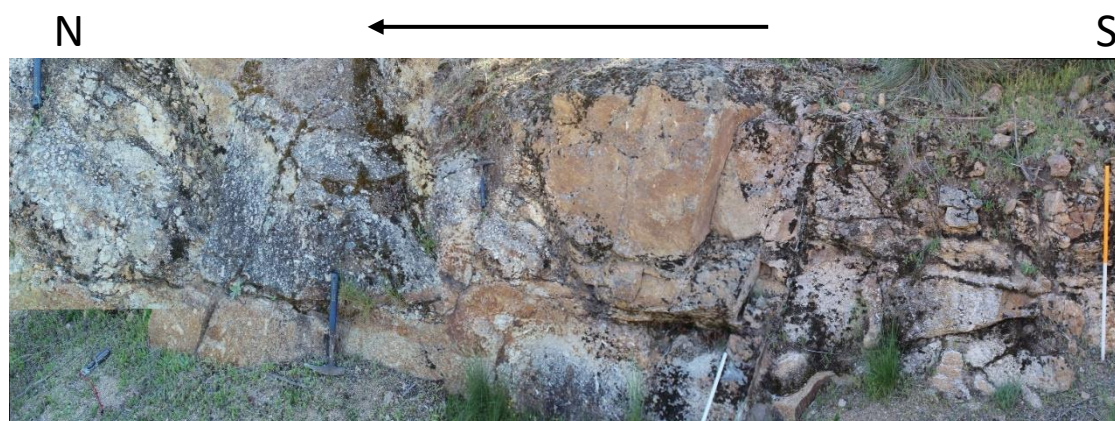


Figura 71 - Vista panorâmica da zona 5.5.

Observando-se com um olhar mais atento, verifica-se que o afloramento apresenta vários estádios de alteração, desde W_1 até W_4 - Figura 72. É bastante comum ver-se capas de oxidação, pelo que denuncia vestígios de água, embora o afloramento se encontre completamente seco - Figura 73.



Figura 72 - Diferentes estádios de alteração no afloramento. Pormenor da capa de oxidação.



Figura 73 - Marcas de água registadas na rocha.

Relativamente à abertura entre diáclases, esta é variável, pois se determinadas zonas do afloramento as diáclases se encontram fechadas, em outros locais do mesmo afloramento, as diáclases encontram-se abertas, podendo chegar aos 15 centímetros. No entanto, verifica-se o predomínio das diáclases fechadas.

Em zonas onde as diáclases se encontram abertas, verifica-se a presença de processos de ocorrência de caulinição dos feldspatos, como preenchimento das mesmas - Figura 74.



Figura 74 - Processo de caulinição.

Para além dos processos de caulinição, verifica-se ainda um preenchimento por musgo das diáclases - Figura 75.



Figura 75 - Evidências de preenchimento por musgo das diáclases.

Este afloramento encontra-se em diversos estádios de graus de rugosidade, situando-se em algumas zonas entre R_{1-2} , classe III, e R_3 , classe IV.

Relativamente ao espaçamento entre diáclases, apresentam valores variáveis, entre 20 centímetros a cerca de 3 metros. Por este motivo, considera-se que o afloramento se encontra em diversos graus de fraturação, desde F_3 a F_1 . Quanto à continuidade, considera-se que as diáclases apresentam uma continuidade muito baixa a baixa, entre os 50 centímetros a 80 centímetros - Figura 76.



Figura 76 - Evidências das fraturação do maciço e da sua continuidade. Aplicação do método scanline.

Capítulo 6.

Tratamento e discussão dos resultados obtidos

6. Tratamento e discussão dos dados recolhidos

A recolha dos dados teve por base campanhas campo, onde foram efetuados registos em diversos pontos distintos do maciço granítico que integra a região da Guarda, nomeadamente, na zona de Almeida. Os dados foram obtidos em afloramentos dispersos, de acordo com a acessibilidade e com preocupações de representatividade.

Posteriormente à recolha dos dados, estes foram tratados com recurso ao software Oriana, um software de tratamento estatístico de dados circulares ou direcionais.

O primeiro passo no tratamento dos dados consistiu na obtenção dos estatísticos básicos, que possibilitam a aquisição de diversos resultados, que podem ser validados ou rejeitados nos testes estatísticos posteriores.

O passo seguinte consistiu na produção de diagramas de roseta da direção e inclinação, para todas as campanhas campo realizadas, definidores das principais famílias de fraturas. Os diagramas de roseta, também conhecido como histograma circular, possibilita a representação dos dados de atitudes em projeções estereográficas; isto permite a demonstração e, subsequente, interpretação da geometria e a atitude das estruturas (Fossen, 2010).

Segundo Fossen (2010), graças à sua eficácia e rapidez, este tipo de métodos de representação é bastante utilizado na apresentação e interpretação dos dados espaciais.

Na figura 77, encontra-se o mapa topográfico da zona cartografada, embora não abranja todas as áreas cartografadas anteriormente.

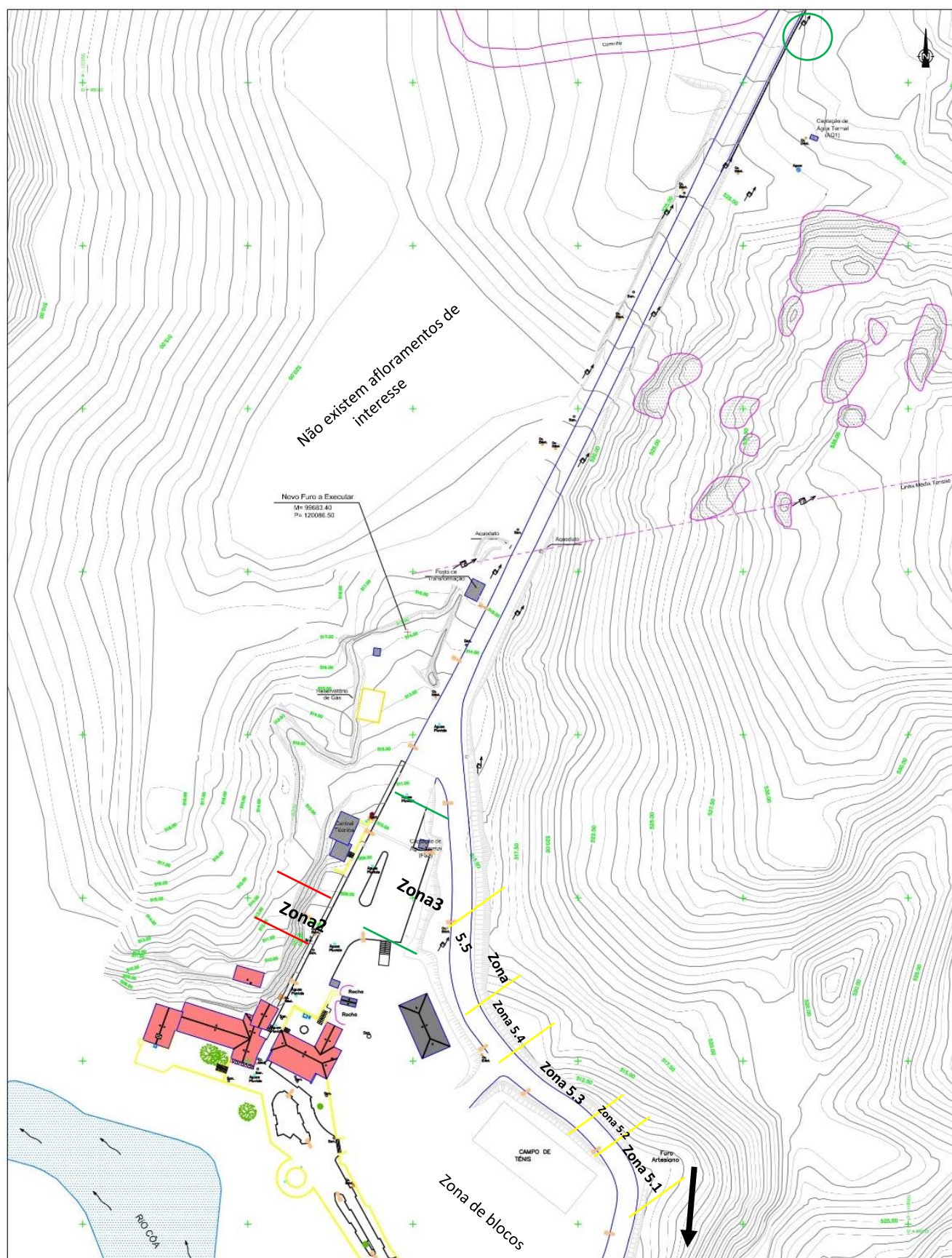


Figura 77 - Mapa topográfico com a representação das zonas cartografadas. O círculo verde indica o início da zona cartografada 1. A seta preta indica a orientação da zona 4 (adaptado do PDM de Almeida).

6.1. Caracterização do maciço segundo os parâmetros geológico-geotécnicos

Na tabela 13 são apresentadas as características do maciço considerado ao longo de Fonte Santa. É efetuada uma análise detalhada comparativa sobre cada um dos parâmetros considerados anteriormente; contudo, importa ressaltar que a análise da atitude geológica, devido à sua importância, é efetuada nos subcapítulos que se seguem.

Tabela 13 - Resumo das características do maciço considerado.

	Grau de alteração	Grau de fraturação	Continuidade ou persistência	Rugosidade	Abertura	Preenchimento	Percolação ou infiltração
Zona 1	W ₁ -W ₄	F ₂ -F ₃	Baixa a média	R ₄₋₅ , classe VII	Descontinuidades fechadas	Musgo	II
Zona 2	W ₁ -W ₃	F ₂ -F ₄	Baixa	R ₁₋₂ , classes I e II; R ₃ , classes V e VI	Descontinuidades fechadas a entreabertas	Musgo, rocha esmagada, minerais de argila, grãos de quartzo	III
Zona 3	W ₂ -W ₄	F ₁ -F ₃	Muito baixa a baixa	R ₃ , classe VI; R ₄₋₅ , classe VIII	Descontinuidades fechadas a abertas	Musgo	II
Zona 4	W ₃ -W ₄	F ₂ -F ₄	Baixa a média	R ₄₋₅ , classes VII e VIII	Descontinuidades fechadas a entreabertas	Musgo, rocha esmagada	III
Zona 5.1	W ₄	F ₂ -F ₃	Baixa	R ₄₋₅ , classe VIII e IX	Descontinuidades abertas	Musgo	II
Zona 5.3	W ₃ -W ₄	F ₃ -F ₄	Baixa	R ₃ , classe VI	Descontinuidades entreabertas a abertas	Minerais de argila e grãos de quartzo	III
Zona 5.5	W ₁ -W ₄	F ₁ -F ₃	Muito baixa a baixa	R ₁₋₂ , classe III; R ₃ , classe IV	Descontinuidades fechadas a abertas	Musgo e processos de caulinição dos feldspatos	III

Grau de alteração

Relativamente à qualidade do maciço, a zona 1, a zona mais afastada do rio Côa, apresenta-se com um maciço são (a rocha não apresenta sinais de alteração) a muito alterado (alteração visível em todo o maciço e rocha já parcialmente friável).

De seguida, e como segunda zona mais afastada do rio Côa, apresenta-se a zona 3, com um maciço pouco alterado (com sinais de alteração junto dos bordos das descontinuidades) a muito alterado (onde a alteração é visível por todo o maciço e a rocha encontra-se ligeiramente friável); comparativamente à zona anterior, verifica-se que maciço se apresenta ligeiramente mais alterado.

Seguindo para a zona 5.5, constata-se que o maciço aflorante se encontra são (a rocha não apresenta sinais de alteração) a muito alterado (alteração visível em todo o maciço e rocha já parcialmente friável); relativamente à zona anterior, constata-se que o maciço da zona 5.5 se encontra ligeiramente menos alterado.

Segue-se a zona 5.1, e tendo sempre em consideração que esta zona carece de diáclases cartografadas; o seu maciço aflorante encontra-se muito alterado, motivos esse para a carência das fraturas cartografadas; comparativamente à zona anterior, este sofre um agravamento significativo.

A zona 4, onde o maciço que aí aflora se encontra medianamente alterado (alteração visível em todo o maciço, com mudanças de cor, mas a rocha ainda não se encontra friável, ou seja, não se desagrega quando em contacto com a água) a muito alterado (a alteração é visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável). Quando se compara com a zona 5.1, verifica-se uma continuidade no estado de alteração; se se quiser comparar com a zona 5.5 verifica-se um ligeiro agravamento do seu grau de alteração.

Na zona 5.3 é a segunda zona mais próxima da falha principal, e o maciço encontra-se medianamente alterado a muito alterado. Se se comparar com o maciço da zona 4, verifica-se uma continuidade no estado de alteração do maciço.

Por último, e junto à zona mais tectonizada, localiza-se a zona 2, que se apresenta com o maciço são (a rocha não apresenta sinais de alteração) a medianamente alterado (alteração visível em todo o maciço, com mudanças de cor, mas a rocha ainda não se encontra friável, ou seja, não se desagrega quando em contacto com a água). Comparativamente ao maciço da zona 5.3 verifica-se uma ligeira melhoria das condições de alteração do mesmo.

Após esta análise, pode-se perceber que até existe um agravamento das condições de alteração do maciço, das diferentes zonas, conforme se aproxima do rio Côa, até à zona 4 inclusive. A partir desta e até à zona 2, que é a zona mais próxima do rio Côa, verifica-se uma ligeira melhoria das condições de alteração do maciço, das diferentes zonas.

Grau de fraturação

O maciço aflorante da zona 1, a zona mais afastada do rio Côa, apresenta-se pouco fraturado a medianamente fraturado, e por consequência, as suas fraturas apresentam-se afastadas a medianamente afastadas.

Segue-se a zona 3, que é a segunda zona mais próxima do rio Côa, onde se verifica que o grau de fraturação é ligeiramente menos fraturado comparativamente à zona 1, podendo ir de muito pouco fraturado a medianamente fraturado e, portanto, as suas diáclases se encontram muito a medianamente afastadas.

A zona 5.5, e o seu maciço aflorante apresenta-se medianamente fraturado a muito fraturado, com as fraturas medianamente afastadas a próximas; deteta-se aqui um aumento do grau de fraturação do maciço relativamente à zona anterior.

De seguida, a zona 5.1 e tendo sempre em mente que esta zona carece de diáclases cartografadas; motivo esse que leva a que diáclases registadas se encontrem afastadas a medianamente afastadas e, por conseguinte, a que o seu maciço seja considerado pouco a medianamente fraturado. Se se comparar com a zona 5.5, constata-se que houve uma melhoria das condições de fraturação nesta zona.

Na zona 4, o seu maciço encontra-se pouco a muito fraturado, e com diáclases afastadas a próximas; comparando esta zona com a zona 5.1, ou se se quiser com a zona 5.5 (uma vez que os resultados da zona 5.1 podem não ser confiáveis devido ao baixo número de observações), conclui-se que há um aumento da fraturação (um possível indicador das proximidades da zona mais tectonizada).

A zona 5.3 com um grau de fraturação do maciço compreendido entre medianamente a muito fraturado, com as fraturas medianamente afastadas a próximas; uma vez mais verifica-se um aumento do grau de fraturação relativamente às zonas anteriormente consideradas.

Finalmente, a zona 2 é onde o maciço encontra-se pouco a muito fraturado, com as diáclases afastadas a próximas e efetuando uma comparação com a zona anterior, verifica-se que houve um agravamento relativamente às condições de fraturação do mesmo.

Torna-se fácil compreender que, de uma forma geral, conforme se vai aproximando da zona tectonizada, as zonas apresentam graus de fraturação mais elevados.

Continuidade ou persistência

No que à continuidade diz respeito, a zona 1 apresenta uma continuidade baixa a média, ou seja, a extensão das diáclases encontra-se entre 1 e 3 metros para uma continuidade baixa e entre 3 a 10 metros para uma continuidade média.

Seguindo para a zona 3, as diáclases registadas nesta zona apresentam uma continuidade muito baixa (a extensão das diáclases é inferior a 1 metro) a baixa, onde a extensão das

diáclases encontra-se no intervalo de 1 a 3 metros. Efetuando-se uma comparação com a zona 1, verifica-se uma diminuição da extensão das diáclases registadas na zona 3.

De seguida, passando para a zona 5.5, as diáclases espelham uma continuidade muito baixa (a extensão das diáclases é inferior a 1 metro) a baixa, onde a extensão das diáclases encontra-se no intervalo de 1 a 3 metros. Comparativamente à zona 3, não se verificam alterações significativas neste parâmetro.

As diáclases da zona 5.1 apresentam-se com uma extensão compreendida entre 1 a 3 metros, revelando uma continuidade baixa. Analogamente à zona 5.5, verifica-se que existiu um aumento da extensão das descontinuidades, não existindo descontinuidades com extensões inferiores a 1 metro.

No que diz respeito à zona 4, verifica-se que as descontinuidades se apresentam com uma continuidade baixa a média, ou seja, entre os 1 e 3 metros a 3 e os 10 metros. Contrapondo com a zona anterior, zona 5.1, entende-se que existiu um aumento da continuidade das diáclases nesta zona.

A zona 5.3 apresenta diáclases com continuidade baixa, onde a sua extensão se encontra entre os 1 e os 3 metros. Comparando com a zona anterior, zona 4, constata-se uma diminuição da continuidade das diáclases.

Por fim, na zona 2, apura-se que a extensão das diáclases é entre 1 e os 3 metros, revelando uma continuidade baixa. Analogamente à zona 5.3, constata-se que não existem alterações significativas relativamente à continuidade das diáclases. Importa salientar que o talude apresenta uma área exposta restrita e que as diáclases cartografadas foram, na sua grande maioria, verticais. Por este motivo, não é possível ter uma real perceção da continuidade das mesmas; ou seja, não é possível saber quais os valores da continuidade em profundidade das diáclases registadas.

Depois de um olhar atento, compreende-se que a continuidade apresenta valores muito baixos a baixos nas zonas mais afastadas do rio Côa, zonas 3 e 5.5 e com exceção da zona 1 e que, conforme, se se aproxima do rio, a continuidade passa a apresentar valores baixos (zonas 5.1, 5.3 e 2), com destaque para a zona 4 que chega mesmo a apresentar valores de continuidade baixa a média.

Rugosidade

Relativamente à rugosidade, as diáclases da zona 1 são consideradas muito rugosas - R_{4-5} , com uma forma do perfil plana; dentro do perfil plano, as diáclases são consideradas rugosas.

Passando para a zona 3, as diáclases são consideradas medianamente rugosas - R_3 , com forma de perfil ondulada e estriadas; existem também diáclases muito rugosas - R_{4-5} , com uma forma do perfil plana e lisa. Analogamente à zona 1, pode-se verificar que houve uma ligeira melhoria neste parâmetro, dado que existência de diáclases medianamente rugosas.

Avançando para a zona 5.5, as diáclases apresentam-se pouco rugosas - R_{1-2} , com forma de perfil denteada e estriada. Há também diáclases que se encontram medianamente rugosas - R_3 , com forma de perfil ondulada e rugosa. Comparando com a zona anterior, verifica-se um decréscimo da rugosidade, em virtude de diáclases pouco rugosas.

A zona 5.1, que carece de número de diáclases, apresenta as suas fraturas muito rugosas - R_{4-5} , com uma forma do perfil plana, sendo que dentro desta forma de perfil, são consideradas lisas a estriadas. Efetuando-se uma comparação entre a zona anterior, verifica-se um agravamento significativo das condições de rugosidade, passando-se de pouco a medianamente rugosas para muito rugosas.

Avançando para a zona 4, verifica-se que as diáclases se apresentam muito rugosas - R_{4-5} , sendo que dentro desta forma de perfil, se encontram rugosas a lisas. Analogamente à zona 5.1, verifica-se uma continuidade no parâmetro da rugosidade.

Passando para a zona 5.3, constata-se que as diáclases se apresentam medianamente rugosas - R_3 , com forma de perfil ondulada e estriadas. Comparativamente à zona anterior, verifica-se uma melhoria nas condições da rugosidade, passando-se de diáclases muito rugosas para medianamente rugosas.

Finalmente, na zona 2, constata-se que as diáclases se encontram pouco rugosas - R_{1-2} , com forma de perfil denteada, de rugosas a lisas. Verificam-se também diáclases medianamente rugosas - R_3 , com forma de perfil ondulada, sendo lisas a estriadas.

Após a análise do parâmetro da rugosidade, verifica-se que as diáclases das zonas mais afastadas do rio Côa - zonas 1 e 3 - apresentam elevados graus de rugosidade. Na zona 5.5 constata-se uma ligeira melhoria das condições deste parâmetro, para logo depois, na zona 4 voltar aos altos níveis. A partir desta zona, está-se cada vez mais junto zona mais tectonizada e ocorre uma diminuição significativa da rugosidade, sendo que nas zonas 5.3 e 2 as diáclases apresentam-se medianamente a pouco rugosas.

Abertura, preenchimento e percolação

No que diz respeito à abertura, a maioria das diáclases da zona 1 encontram-se fechadas, com aberturas de escassos milímetros, que permitem que o musgo as preenchem. No que diz respeito à percolação, o material de preenchimento é húmido, mas sem a presença de água livre.

Passando à zona 3, as descontinuidades encontram-se fechadas a abertas, indicando que estas se encontram abertas por escassos milímetros a abertas até cerca de 10 milímetros, o que permite que o preenchimento destas seja efetuado por musgo. Relativamente à percolação, o material de enchimento encontra-se seco, não se verificando a presença de água livre. Comparativamente à zona 1, percebe-se que há um aumento na abertura das diáclases, mas que o seu material de preenchimento permanece igual.

Na zona 5.5, as descontinuidades encontram-se fechadas a abertas, demonstrando que estas se encontram abertas por escassos milímetros a abertas até cerca de 10 milímetros, possibilitando o preenchimento destas por musgo. A descontinuidade encontra-se seca, mas com evidências de fluxo de água, ou seja, marcas de oxidação. Comparativamente com a zona anterior, verifica-se que não existem alterações relativamente a este parâmetro.

Relativamente à zona 5.1, estas encontram-se abertas, e o seu preenchimento é efetuado por musgo; relativamente, o material de enchimento é seco, mas não se verifica a presença de água livre. Comparativamente à zona 5.5, há um aumento significativo na abertura das descontinuidades.

A zona 4, apresenta-se com descontinuidades fechadas a entreabertas, preenchidas por musgo e rocha esmagada; no que diz respeito à percolação, o material de enchimento encontra-se molhado e com gotejamento ocasional. Analogamente à zona 5.1, verifica-se uma diminuição no grau de abertura das descontinuidades e a presença de água (gotejamento ocasional).

A zona 5.3, apresenta-se com descontinuidades entreabertas a abertas, e o seu preenchimento é efetuado por minerais de argila e grãos de quartzo. A descontinuidade encontra-se seca, no momento do levantamento, mas com evidências de fluxo de água, ou seja, marcas de oxidação. Comparativamente à zona 4, constata-se que as descontinuidades se encontram mais abertas, e com evidências de fluxo de água.

Por fim, na zona 2, a zona mais próxima da falha principal, as descontinuidades encontram-se fechadas a entreabertas, preenchidas por musgo, rocha esmagada, minerais de argila e grãos de quartzo. Estas encontram-se secas, mas com evidências de fluxo de água. Analogamente à zona 5.3, verifica-se uma redução da abertura das descontinuidades, estando estas muito mais preenchidas.

Depois de um olhar atento à análise efetuada, percebe-se as zonas mais afastadas do rio Côa - zonas 1, 5.5 e 3, passam de diáclases fechadas a abertas. A zona 5.1 apresenta as suas diáclases abertas e a partir desta zona, e conforme se caminha para o rio, as diáclases das restantes zonas passam a ser entreabertas a fechadas. O preenchimento é efetuado maioritariamente por musgo, em todas as zonas, com destaque para as zonas 5.3 e 2, que se encontram preenchidas por minerais de argila e grãos de quartzo. Realçar ainda a zona 4, que é a única que se encontra com sinais visíveis de água - o gotejamento ocasional.

6.2. Estatísticos básicos e testes de ajustamento

O primeiro passo no tratamento dos dados para os valores da atitude, consistiu na obtenção dos estatísticos básicos - Tabela 14 -, para todas as zonas cartografadas, possibilitando a aquisição de diversos resultados, que podem ser validados ou rejeitados nos testes estatísticos posteriores.

Tabela 14 - Estatísticos básicos das zonas cartografadas.

		Nº de observações	Vetor Médio (μ)	Comprimento Vetor Médio (r)	Mediana ($^{\circ}$)	Moda ($^{\circ}$)	Coeficiente de Concentração (\hat{k})	Variância Circular (V)	Desvio padrão circular	Intervalo de confiança para μ			
										95% (-)	95% (+)	99% (-)	99% (+)
Zona 1	Direção	16	77,355	0,919	86	86	6,44	0,081	23,582	65,811	88,9	62,184	92,526
	Inclinação	16	74,574	0,952	83	80	10,689	0,048	17,968	65,772	83,377	63,007	86,142
Zona 2	Direção	57	100,545	0,448	90	80	1,002	0,552	72,571	78,349	122,742	71,376	129,714
	Inclinação	57	77,209	0,976	90	80	20,711	0,024	12,748	73,899	80,519	72,86	81,559
Zona 3	Direção	28	78,728	0,817	90	90	3,091	0,183	6,812	65,373	92,082	61,178	96,277
	Inclinação	28	69,921	0,934	80	80	7,874	0,066	3,992	62,095	77,748	59,636	80,206
Zona 4	Direção	18	73,386	0,598	87	0	1,502	0,402	58,071	45,46	101,311	36,688	110,083
	Inclinação	18	76,264	0,916	84	89	6,264	0,084	23,943	65,184	87,284	61,713	90,755
Zona 5.1	Direção	6	138,371	0,638	139	190	1,474	0,362	54,356	91,066	185,676	76,206	200,535
	Inclinação	6	80,337	0,997	80	80	53,216	0,005	5,909	75,365	87,97	73,385	89,95
Zona 5.3	Direção	18	82,334	0,487	90	90	1,114	0,513	68,689	46,399	118,269	35,112	129,557
	Inclinação	18	78,012	0,992	90	80	66,002	0,008	7,08	74,741	81,283	73,713	82,311
Zona 5.5	Direção	78	92,52	0,73	90	90	2,21	0,27	45,414	85,511	102,529	79,367	105,673
	Inclinação	78	74,196	0,954	80	80	11,254	0,046	17,488	70,316	78,077	69,097	79,296

A análise da tabela 14 permite a seguintes ilações diretas:

- Os estatísticos de primeira ordem (estatísticos de tendência central - média, mediana e moda), apresentam, quer para a direção como para a inclinação valores muito semelhantes, para as zonas 1, 4 e 5.3. As zonas 2, 3, 5.1 e 5.5 apresentam discrepâncias relativamente à média quando se comparam os valores da direção e da inclinação;
- Quanto aos estatísticos de segunda ordem (também designados de estatísticos de dispersão - coeficiente de concentração, variância e desvio padrão circular), estes indicam uma maior variabilidade para a direção, em detrimento da menor dispersão de valores exibida pela inclinação, para todas as zonas. A este facto não será estranho o intervalo de valores das diferentes variáveis em apreço.

Os estatísticos básicos podem não possibilitar a obtenção de resultados muito significativos; apesar disso, a sua aquisição é fundamental pelo aumento da importância que estes mesmos ganham conforme se vai entrando na estatística profunda (Carvalho, 2010).

Número de observações:

O número de observações é um indicador de especial importância na estatística, dado que se encontra associado à robustez dos valores conseguidos. Facilmente se compreenderá que, quanto maior for o número de observações, mais robustos serão os estatísticos que deste se obtém (Barros, 2016).

Direção e inclinação do vetor médio:

Este indicador possibilita a identificação da direção média ou orientação geral dos dados dos maciços considerados. A inclinação do vetor médio proporciona o reconhecimento da inclinação média, caracterizadora da estrutura considerada. Os valores da inclinação média encontram-se contidos no intervalo de 0° a 90° , sendo que, valores próximos de 0° indicam estruturas subhorizontais, e valores próximos de 90° sugerem estruturas subverticais (Barros, 2016).

Mediana:

A mediana consiste numa medida de localização central da distribuição dos dados. É fornecedora de informações relativamente à simetria distribucional dos dados, particularmente quando comparada com o comprimento do vetor unitário. Desta forma, dados com maiores disparidades relativamente ao valor da mediana e do vetor médio, apresentam menor simetria distribucional; já os dados com mais semelhanças entre o valor da mediana e o vetor médio, apresentam simetria clara junto dos estatísticos de tendência central (Barros, 2016)

Comprimento do vetor médio, coeficiente de concentração, variância e dispersão circular e intervalos de confiança:

Uma das possíveis interpretações para o comprimento do vetor médio pode ser considerá-lo como sendo uma medida de concentração dos dados junto de um ângulo médio de um determinado conjunto de registos, onde a sua variação é proporcional à concentração desses mesmos registos. Contudo, outras medidas de dispersão são frequentemente utilizadas, nomeadamente, o coeficiente de concentração (\hat{k}), a variância circular (V), e ainda o desvio padrão circular (s). Por observação direta da tabela 14, verifica-se que estas medidas de dispersão se encontram relacionadas com o comprimento do vetor médio; ou seja, conforme o comprimento do vetor médio aumenta, observa-se um aumento da concentração e uma diminuição do desvio padrão e da variância circulares. Desta forma, torna-se imediata a leitura e destes resultados, indicando uma maior ou menor concentração dos dados de direção ou inclinação junto do vetor médio.

Relativamente aos intervalos de confiança, estes estão dependentes de um intervalo junto do valor médio e de um nível de confiança pré-definido. Portanto, os registos onde se verifique um elevado comprimento do vetor médio, uma elevada concentração e uma diminuída variância e desvio padrão circulares, devem apresentar um intervalo de confiança bastante reduzido, indicando baixa dispersão das variáveis, neste caso direção/inclinação, em análise (Barros, 2016).

Simultaneamente à obtenção dos estatísticos básicos, efetuou-se uma sequência de testes de ajustamento, tabela 15, com a finalidade de analisar a qualidade do ajustamento dos dados experimentais, os resultantes das observações, a eventuais das distribuições teóricas (Góis, 2002). A verificarem-se boas qualidades de ajustamento poder-se-á encetar um novo caminho na investigação das variáveis que contemple a abordagem probabilística (por exemplo a simulação com base nas leis teóricas de distribuição de probabilidades que melhor se ajustam) dos fenómenos em estudo.

Tabela 15 - Testes de ajustamento.

		Teste Rayleigh (Z)	Teste Rayleigh (p)	Teste de Rao (U)	Teste de Rao (p)	Teste de Watson U ² (von Mises, U ²)	Teste de Watson U ² (p)	Teste de Kuiper (von Mises, V)	Teste de Kuiper (p)	Teste V (V; média esperada 0,00)	Teste V (u)	Teste V (p)	Correlação circular-circular (p)
Zona 1	Direção	13,507	5,67E-07	266,5	< 0.01	0,384	< 0.005	2,183	< 0.01	0,201	1,138	0,129	< 0,05
	Inclinação	14,501	4,00E-07	290,5	< 0.01	0,233	< 0.005	1,913	< 0.025	0,253	1,432	0,077	
Zona 2	Direção	11,459	1,06E-05	246,211	< 0.01	0,337	< 0.005	2,822	< 0.01	-0,082	-0,876	0,809	< 0,05
	Inclinação	54,247	< 1E-12	302,053	< 0.01	0,657	< 0.005	3,329	< 0.01	0,216	2,306	0,01	
Zona 3	Direção	18,708	8,18E-09	262,571	< 0.01	0,528	< 0.005	2,794	< 0.01	0,16	1,196	0,117	< 0,05
	Inclinação	24,436	1,4E-10	296,429	< 0.01	0,436	< 0.005	2,605	< 0.01	0,321	2,4	0,008	
Zona 4	Direção	6,444	9,67E-04	178	< 0.05	0,074	0.15 > p > 0.1	1,141	> 0.15	0,171	1,026	0,154	< 0,05
	Inclinação	15,116	2,15E-07	283	< 0.01	0,407	< 0.005	2,426	< 0.01	0,218	1,308	0,096	
Zona 5.1	Direção	2,439	8,30E-02	228	< 0.01	*****	*****	1,635	0.10 > p > 0.05	-0,477	-1,651	0,95	< 0,05
	Inclinação	5,937	1,52E-05	283	< 0.01	*****	*****	1,351	> 0.15	0,144	0,499	0,314	
Zona 5.3	Direção	4,276	1,20E-02	188	< 0.01	0,049	0.5 > p > 0.25	1,053	> 0.15	0,065	0,39	0,35	< 0,05
	Inclinação	17,727	5,11E-08	315	< 0.01	0,16	< 0.025	1,531	> 0.15	0,206	1,237	0,109	
Zona 5.5	Direção	41,614	< 1E-12	222,462	< 0.01	0,271	< 0.005	2,334	< 0.01	-0,032	-0,401	0,655	< 0,05
	Inclinação	71,062	< 1E-12	289,308	< 0.01	1,241	< 0.005	4,174	< 0.01	0,26	3,247	0,001	

Nota: o nível de significância “ α ” considerado, foi $\alpha = 0,05$. ***** - os resultados não podem ser calculados. Os valores podem não ser confiáveis devido à baixa concentração (ou seja, distribuição uniforme).

A observação dos resultados obtidos e que resultam da realização dos diferentes testes de ajustamento (tabela 15), possibilitam as seguintes conclusões diretas:

- Considerando os resultados obtidos para o teste de Uniformidade de Rayleigh, quer para o teste de Uniformidade de Rao, (hipótese H0: “O conjunto das observações está distribuída uniformemente em torno do círculo”), os vários registos (dados de direção e/ou inclinação) nas diferentes zonas, rejeitam a hipótese nula permitindo a conclusão que estes não se encontram uniformemente distribuídos. A exceção aos resultados obtidos parece ser o teste de Uniformidade de Rayleigh, relativo aos dados da variável direção da zona 5.1 (valor de p superior ao nível de significância) mas que, no entanto, este resultado deverá ser “lido” com cautela, uma vez que o número de observações, nesta zona, é muito reduzido (6 medições).
- Analisando os valores obtidos para o teste de Watson, segundo a distribuição de von Mises, (hipótese H0: “A amostra tem origem numa distribuição de von Mises”), os diversos registos (dados relativos à direção e/ou inclinação) nas distintas zonas, rejeitam a hipótese nula, concluindo-se que os mesmos não têm origem numa distribuição de von Mises. Contudo, existem três exceções: os valores da direção relativos à zona 4 (valor de p compreendido entre valores superiores ao nível de significância), sendo que a mesma situação se verifica para os valores da direção da zona 5.3; os valores da direção e inclinação relativos à zona 5.1, não puderam ser calculados, devido ao reduzido número de observações aqui registados (6 registos).
- Examinando os valores conseguidos para o teste de Kuiper, segundo a distribuição de von Mises, (hipótese H0: “A amostra tem origem numa distribuição de von Mises”), constata-se, os variados registos (dados relativos à direção e/ou

inclinação) nas diferentes zonas, rejeitam a hipótese nula, deduzindo-se que os mesmos não têm origem numa distribuição de von Mises. No entanto, verificam-se cinco exceções: os valores da direção referentes à zona 4 (valor de p superior ao nível de significância), corroborando o teste de Watson efetuado; os valores da direção e inclinação referentes à zona 5.1, onde o valor de p é superior ao nível de significância considerado (o teste de Kuiper, ao contrário do teste de Watson, não considera o número de observações, uma vez que é efetuada uma comparação direta da distribuição dos dados previamente ordenados com a função teórica pretendida); os valores da direção e inclinação relativos à zona 5.3, onde o valor de p é superior ao nível de significância considerado (neste caso, o teste de Watson apenas corrobora os valores da direção);

- Observando os valores para a correlação circular-circular, verifica-se que em nenhuma das zonas existe qualquer associação entre os valores da direção e da inclinação, uma vez que os valores de p são inferiores ao nível de significância considerado.

6.3. Diagramas de roseta e diagramas de densidade de polos

Os diagramas de densidade de polos, tem como principal funcionalidade definir as principais famílias dos dados considerados.

Os diagramas de roseta, apresentam variadas e relevantes funcionalidades, entre as quais (Carvalho, 2010):

- Reconhecer as direções estruturais predominantes de cada local de amostragem;
- Conhecer a frequência dos dados que formam cada “pétala”, recorrendo aos círculos internos;
- Conseguir a direção média, demonstrada pelo segmento de reta no interior do círculo;
- Obter o intervalo de confiança para a direção média, pelo arco exterior ao círculo.

Neste caso, os diagramas foram obtidos na forma circular, onde o valor 0 é correspondente à direção norte, com a leitura efetuada no sentido dos ponteiros do relógio (Carvalho, 2010).

6.4. Zona 1

Na zona 1 foram efetuados 16 levantamentos de descontinuidades, e através do diagrama de densidade de polos, reconhece-se uma família de fraturas principal, com orientação geral E-W - figura 78.

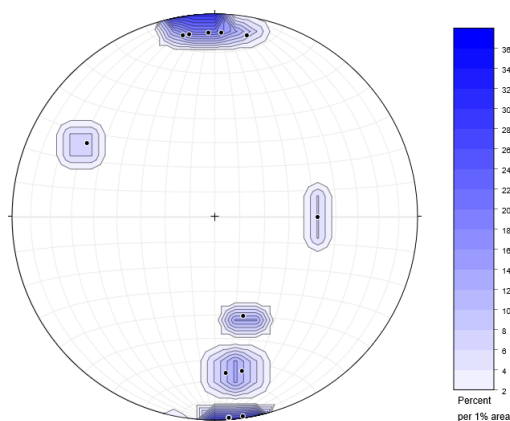


Figura 78 - Diagrama de densidade de polos da zona 1. (16 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

De seguida, efetuou-se uma análise aos valores das direções das diáclases cartografadas - figura 79. Verifica-se que a direção estrutural predominante se encontra entre os 80° e os 100° , com cerca de 11 diáclases registadas entre esses mesmos valores. A direção média para as diáclases cartografadas é de $77,4^\circ$ e o seu intervalo de confiança para 95% vai desde $65,8^\circ$ até $88,9^\circ$.

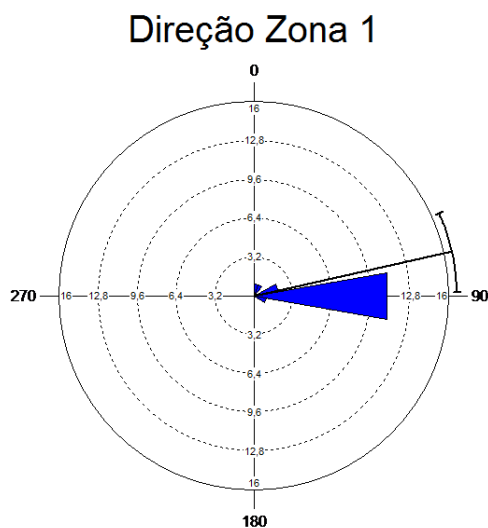


Figura 79 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 1. (16 diáclases registadas.)

Efetuando-se uma correlação linear-circular entre a orientação da inclinação e os ângulos desta última, obtém-se o gráfico da figura 80. A grande maioria das diáclases nesta zona, cerca de 94% dos registos efetuados, inclina para N, W e S, em igual quantidade. Ou seja, quer isto dizer que tanto para N, W e S, se verificam cerca de 31% das ocorrências registadas. Para N, registam-se ângulos de inclinação de 90° , ou seja, subverticais. Para W, os ângulos de inclinação encontram-se entre 42° e 66° . No caso de S, os ângulos de inclinação são de 88° .

Uma inexpressiva minoria das diáclases registadas, cerca de 6%, apresenta inclinação para SE, com valor de inclinação de 62° . Relativamente às restantes orientações, não se registou numa inclinação.

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 1)

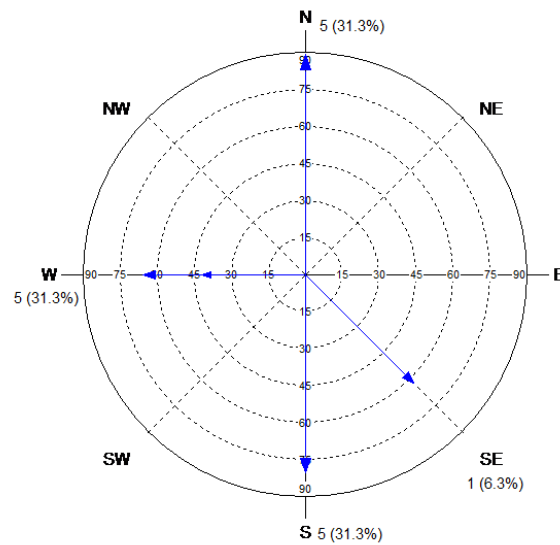


Figura 80 - Representação gráfica dos registos das inclinações na Zona 1. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (16 diáclases registadas.)

6.5. Zona 2

A zona 2 é composta por 57 diáclases cartografadas, onde se reconhecem duas famílias de diáclases, uma proeminente, com orientação praticamente E-W e uma outra família de orientação N-S - Figura 81.

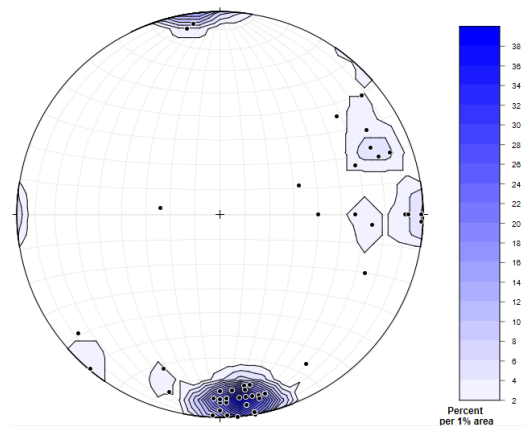


Figura 81 - Diagrama de densidade de polos da zona 2. (57 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

Analisando os registos da direção das 57 diáclases cartografadas, figura 82, verifica-se que a direção estrutural predominante se situa entre os 80° e os 100° , registando-se cerca de 24 diáclases entre esses valores. A direção média registada as diáclases registadas é de cerca de $100,5^\circ$, com intervalos de confiança de 95% entre os $78,3^\circ$ e os $122,7^\circ$.

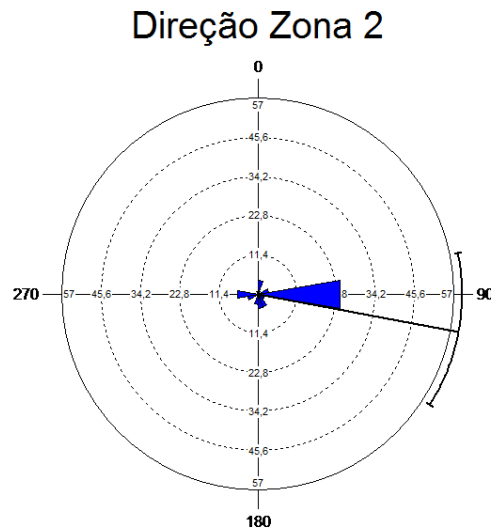


Figura 82 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 2. (57 diáclases registadas.)

Considerando a orientação da inclinação e os seus ângulos, verifica-se uma predominância absoluta da orientação Norte, onde se registam 44 das 57 das diáclases registadas, ou seja, cerca de 77% da totalidade dos registos efetuados nesta zona, onde os ângulos variam entre os 64° e os 90° (subverticais) - Figura 83. Com 8 diáclases registadas, cerca de 14% da totalidade das mesmas, segue-se Oeste, como segunda orientação preferencial da inclinação. Os ângulos encontram-se entre os 34° e os 72° . As orientações SW, S e E, apresentam-se como uma minoria, registando-se, cerca de 9% do total das diáclases registadas. No caso de SW, os valores da inclinação variam entre 64° e 80° . No caso de E, apenas se regista 1 diáclase com o valor de inclinação de 24° . Para S, também se verifica apenas 1 diáclase, com valor da inclinação de 84° .

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 2)

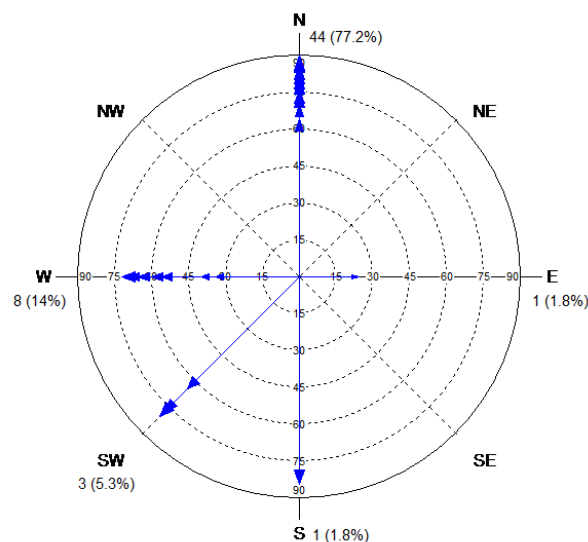


Figura 83 - Representação gráfica dos registos das inclinações na Zona 2. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (57 diáclases registadas.)

6.6. Zona 3

Ao longo da zona 3 registam-se 28 diáclases, onde é possível reconhecer duas famílias de fraturas, uma protuberante, com orientação E-W, uma segunda família ESE-WNW - Figura 84.

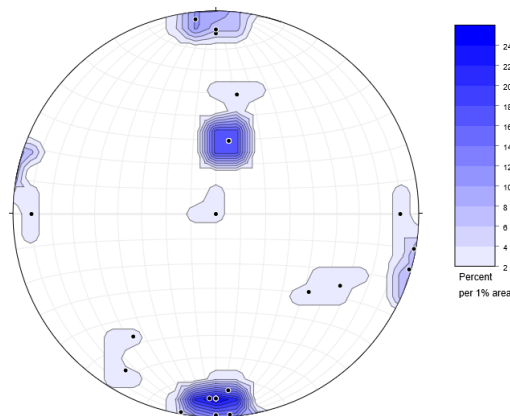


Figura 84 - Diagrama de densidade de polos da zona 3. (28 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

Verificando os registos da direção das diáclases registadas, figura 85, verifica-se que a direção estrutural predominante se situa entre os 80° e os 100° , com cerca de 12 das 28 diáclases registadas. A direção média para as diáclases registadas é de $78,7^\circ$. Relativamente ao intervalo de confiança para 95%, este varia entre $65,4^\circ$ e $92,1^\circ$.

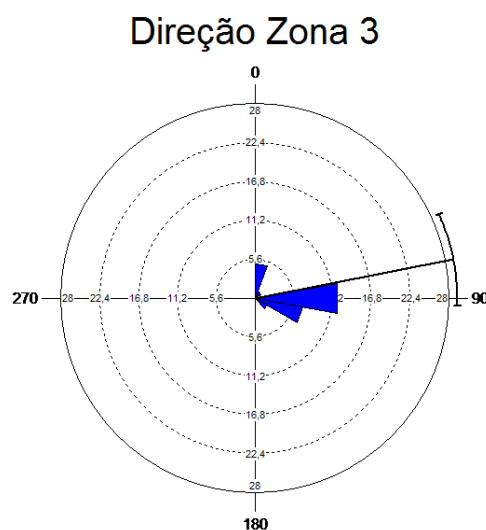


Figura 85 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 3. (28 diáclases registadas.)

Atentando na representação gráfica da figura 86, verifica-se a predominância da orientação Norte, com 20 das 28 diáclases registadas, cerca de 69% da totalidade. Os valores da inclinação variam entre os 30° e os 89° (subverticais). A orientação Sul aparece em segundo lugar, com cerca de 20,7%, com 6 diáclases, estando os ângulos de inclinação compreendidos entre 30° e 86° .

Para as orientações NW e E, apenas se registam cerca de 10,3% do total das diáclases registadas, sendo que para NW se verificam 2, com ângulos de inclinação entre os 0° e os 60° ; no caso de E, apenas se regista uma diáclase com ângulo de inclinação de 80° .

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 3)

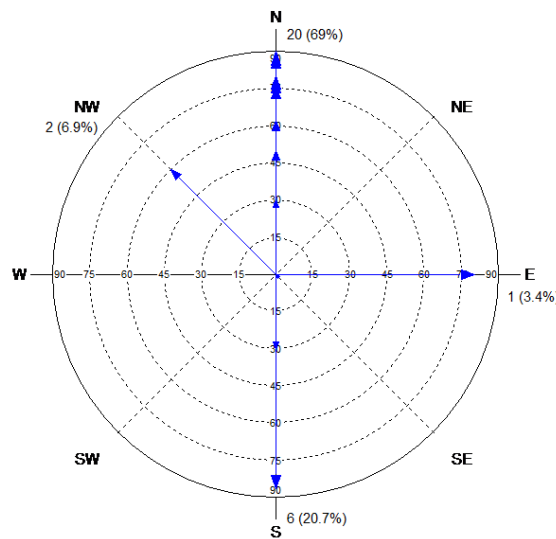


Figura 86 - Representação gráfica dos registos das inclinações na Zona 3. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (28 diáclases registadas.)

6.7. Zona 4

Na zona 4 encontram-se registadas 18 diáclases, onde é possível identificar três principais famílias de fraturas: uma família de orientação N-S, uma segunda família de orientação E-W, e uma terceira NNW-SSE - figura 87.

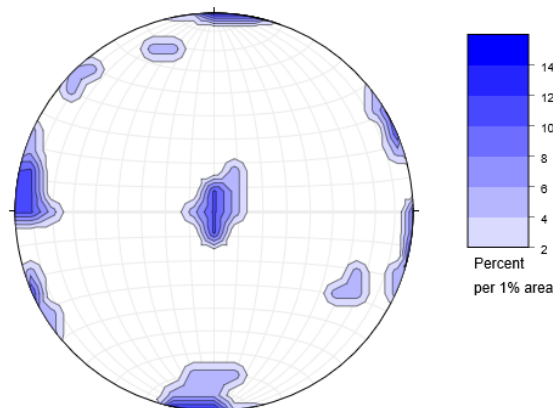


Figura 87 - Diagrama de densidade de polos da zona 4. (18 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

No que diz respeito à análise das direções das diáclases cartografadas nesta zona, figura 88, verifica-se duas direções estruturais predominantes. Entre o intervalo 0° - 20° , existem cerca de 5 diáclases registadas, sendo que o mesmo valor se verifica para o intervalo de valores 80° - 100° . A direção média para as diáclases registadas é de $73,4^\circ$, sendo que o intervalo de confiança para 95% varia entre $45,5^\circ$ e $101,3^\circ$.

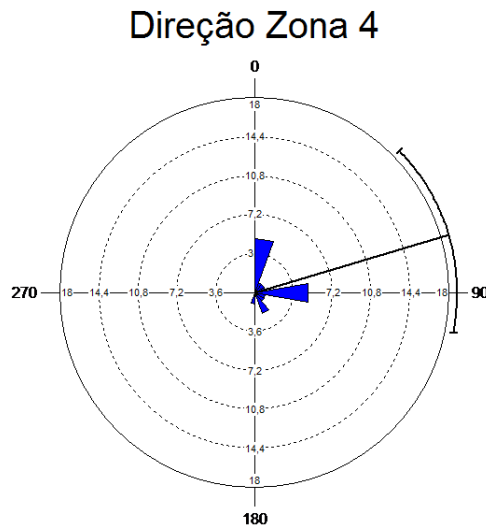


Figura 88 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 4. (18 diáclases registadas.)

No caso da zona 4, verifica-se uma predominância da orientação N, com cerca de 55,6% das observações registadas, ou seja, 10 das 18 diáclases cartografadas - Figura 89. Os ângulos das inclinações estão compreendidos entre 70° e 89° (subverticais). Para W, SE e E verifica-se um total de cerca de 33,3%, sendo que se registou duas diáclases para cada orientação. No caso de W, os valores da inclinação variam entre 0° e 68° . Para SE, os valores estão compreendidos entre 82° e 86° . Relativamente a E, os ângulos variam entre 74° e 80° .

Existe uma inexpressiva minoria das diáclases registadas que apresentam inclinações para S e para SW, em ambos os casos, cerca de 5,6%. No caso de S, o ângulo da inclinação é de 74° e para SW o valor é de 16° .

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 4)

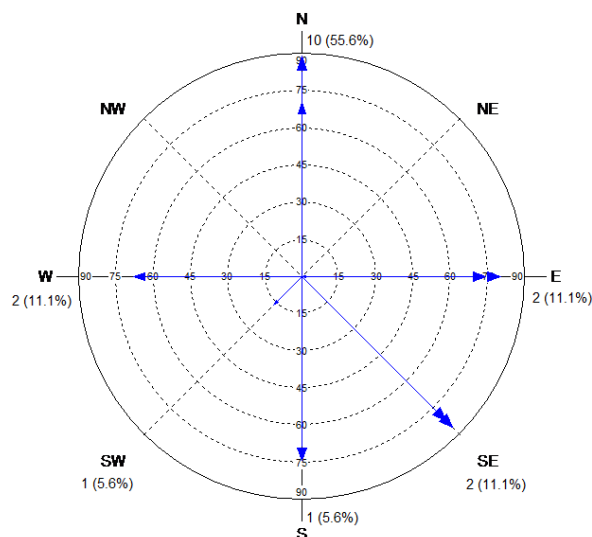


Figura 89 - Representação gráfica dos registos das inclinações na zona 4. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (18 diáclases registadas.)

6.8. Zona 5

Devido à elevada extensão do afloramento, este foi subdividido em 5 zonas mais pequenas. O critério utilizado foi a existência de zonas bastante alteradas e cobertas por vegetação que impossibilitavam a medição de diáclases.

a) Zona 5.1

Ao longo da zona 5.1 foram cartografadas apenas 6 diáclases, uma vez que o estado da rocha já se encontrava bastante alterado. Pelo diagrama de densidade de polos, figura 90, encontram-se três famílias de fraturas principais: uma de orientação geral NNE-SSW, uma de E-W e uma família de orientação N-S.

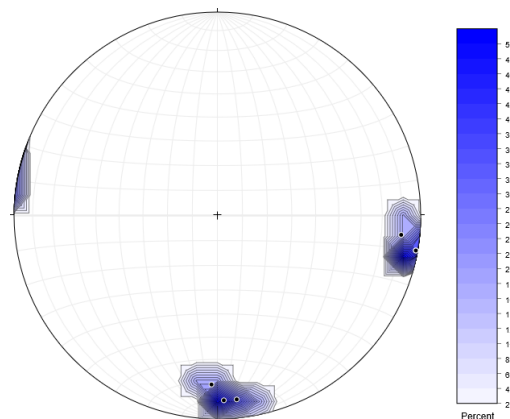


Figura 90 - Diagrama de densidade de polos da zona 5.1. (6 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

Relativamente à direção das diáclases cartografadas, figura 91, estas apresentam duas direções predominantes, $80^\circ - 100^\circ$ e $180^\circ - 200^\circ$, com 3 registos cada. Relativamente à direção média das diáclases cartografadas, esta apresenta um valor de $138,4^\circ$, e para um intervalo de confiança a 95%, os valores variam entre $91,1^\circ$ e $185,7^\circ$.

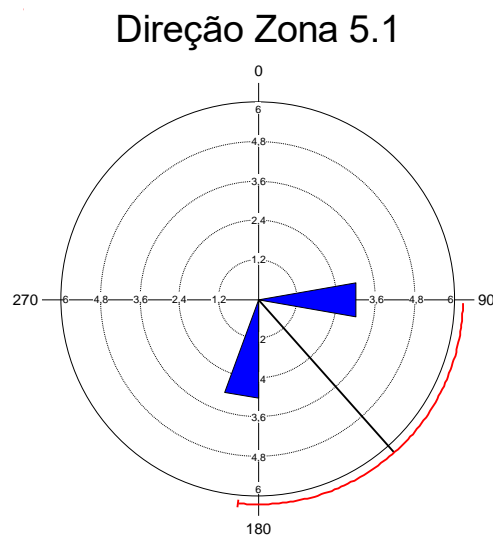


Figura 91 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 5.1. (6 diáclases registadas.)

As inclinações das diáclases apresentam apenas duas direções, N e W. Para N, registam-se 4 diáclases, cerca de 66,7% da totalidade registada, com valores de inclinação entre 72° e 89° (subverticais). No caso de W, apenas se verificam 2 diáclases, cerca de 33,3% do total, com valor de 80°.

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 5.1)

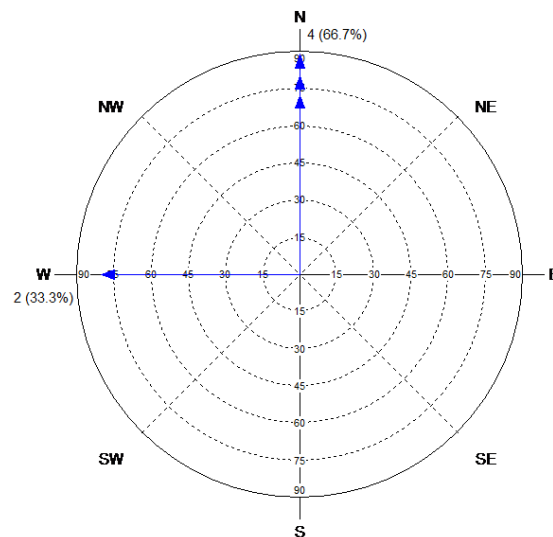


Figura 92 - Representação gráfica dos registos das inclinações na zona 5.1. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (6 diáclases registadas.)

b) Zona 5.3

Ao longo desta zona, registaram-se 18 diáclases, e no que diz respeito à análise do diagrama de densidade de polos, é possível identificar duas famílias de fraturas, uma de orientação NNE-SSW e uma segunda família de orientação praticamente E-W - figura 93.

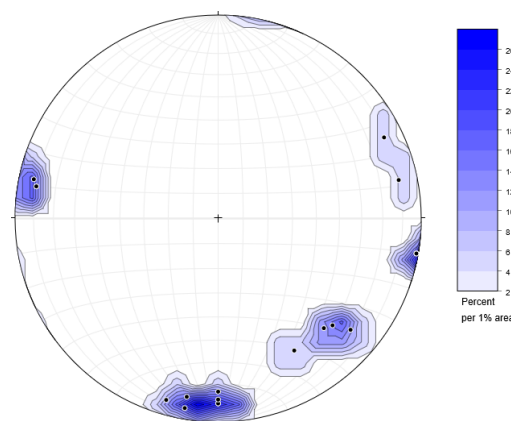


Figura 93 - Diagrama de densidade de polos da zona 5.3. (18 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

Quanto à análise da direção das diáclases registadas, figura 94, não se verifica nenhuma direção predominante, dado os intervalos 0°- 20°, 40°- 60°, 80°- 100° e 100°- 120° se apresentam com o mesmo número de diáclases cartografadas - cada intervalo regista três das 18 diáclases cartografadas. A direção média é de 82,3° e para um intervalo de confiança de 95%, os valores variam entre 46,4° e 118,3°.



Figura 94 - Representação gráfica dos registos das inclinações na zona 5.3. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (18 diáclases registadas.)

Conforme a figura 95, nesta zona, mais de metade das diáclases registadas inclinam para N, cerca de 55,6%, 10 das 18 observações. Os ângulos de inclinação encontram-se entre os 64° e os 89° (subverticais).

Quer para NW como para E, o número de observações é o mesmo, com cerca de 16,7% cada, 3 diáclases. No caso de NW, os ângulos de inclinação encontram-se entre 64° e os 74° . Para E, o valor das inclinações varia entre 80° e 82° .

Para SW, registam-se 2 diáclases, cerca de 11,1% do total, com valores de inclinação entre os 80° e os 82° .

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 5.3)

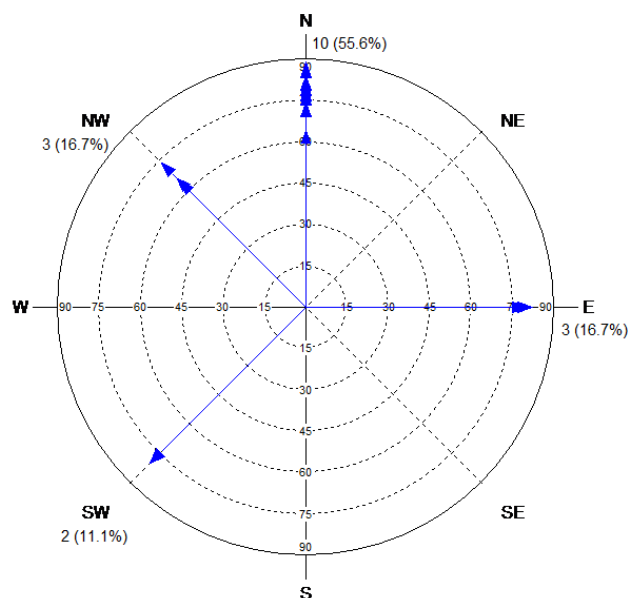


Figura 95 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 5.3. (18 diáclases registadas.)

c) Zona 5.5

Ao longo desta zona foram cartografadas 78 diáclases, sendo a zona com mais diáclases registadas. Analisando o diagrama de densidade de polos desta zona, são perceptíveis duas famílias de fraturas, uma de orientação E-W, e uma segunda, de orientação N-S - figura 96.

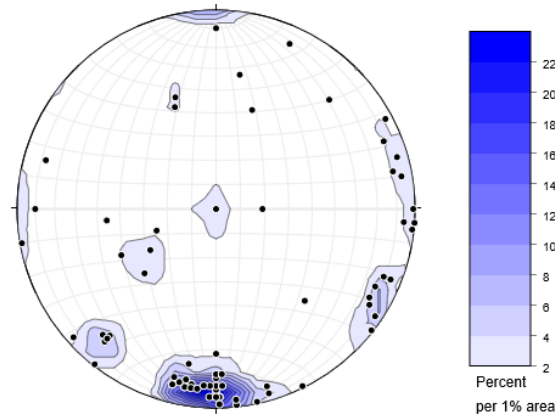


Figura 96 - Diagrama de densidade de polos da zona 5.5. (78 diáclases registadas. A escala representa percentagem por 1% de área.)

Quanto à análise da direção das diáclases registadas, figura 97, verifica-se que existe uma direção estrutural predominante entre o intervalo 80° - 100° , com cerca de 24 diáclases registadas nesse intervalo. A direção média para as diáclases cartografadas é de $92,5^\circ$, e para um intervalo de confiança de 95%, os valores variam entre $85,5^\circ$ e $102,5^\circ$.



Figura 97 - Diagramas de roseta da variável direção da Zona 5.5. (78 diáclases registadas.)

A grande maioria das diáclases nesta zona, cerca de 85% das observações registadas, inclina para N, NW e W - Figura 98. Para N, verificam-se 54 diáclases, cerca de 68,4% da totalidade das observações registadas, estando o valor da inclinação entre os 30° e os 90° (subverticais). No caso de NW, registam-se 7 diáclases, cerca de 8,9%, estando os seus valores de inclinação entre 54° e 86° . Relativamente a W, verifica-se cerca de 7,6%, 6 das diáclases registadas, com valores da inclinação compreendidos entre 0° e 86° .

Alguma das estruturas registadas, cerca de 8,9%, inclinam para SW e S. No caso de SW, verificam-se 4 diáclases registadas, cerca de 5,1%, com valores da inclinação entre os 44° e os 80°. Para S, estão registadas 3 diáclases, cerca de 3,8%, com ângulos de inclinação compreendidos entre os 46° e os 58°.

Para E, inclinam 4 diáclases observadas, cerca de 5,1%, com valores entre os 26° e os 80°.

Para NE regista-se uma inexpressiva minoria, apenas 1 diáclase registada, cerca de 1,3%, sendo o seu valor de 74°.

Orientação da inclinação e respetivo ângulo (zona 5.5)

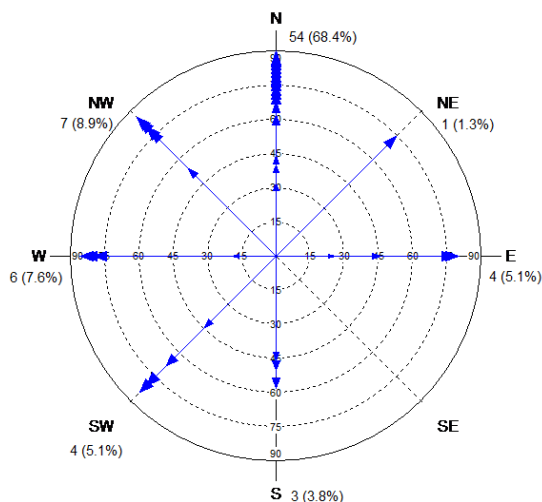


Figura 98 - Representação gráfica dos registos das inclinações na zona 5.3. Leitura do ângulo de inclinação e sentido dessa mesma inclinação. (79 diáclases registadas.)

6.9. Discussão dos dados recolhidos

Uma das questões que contempla esta dissertação é saber se as famílias de diáclases obtidas se intercetam entre si, de forma a entender se a presença da fraturação possibilita a infiltração de água na área envolvente às captações de água que abastecem o balneário termal.

Através dos diagramas de polos obtidos anteriormente, foi possível obter os planos médios para cada uma das zonas analisadas. Posteriormente, e recorrendo ao programa *StereoNet*, foi exequível efetuar a interseção de cada um dos planos para cada uma das zonas consideradas - Figura 99, de forma a investigar a possibilidade de infiltração de água através da presença das mesmas.

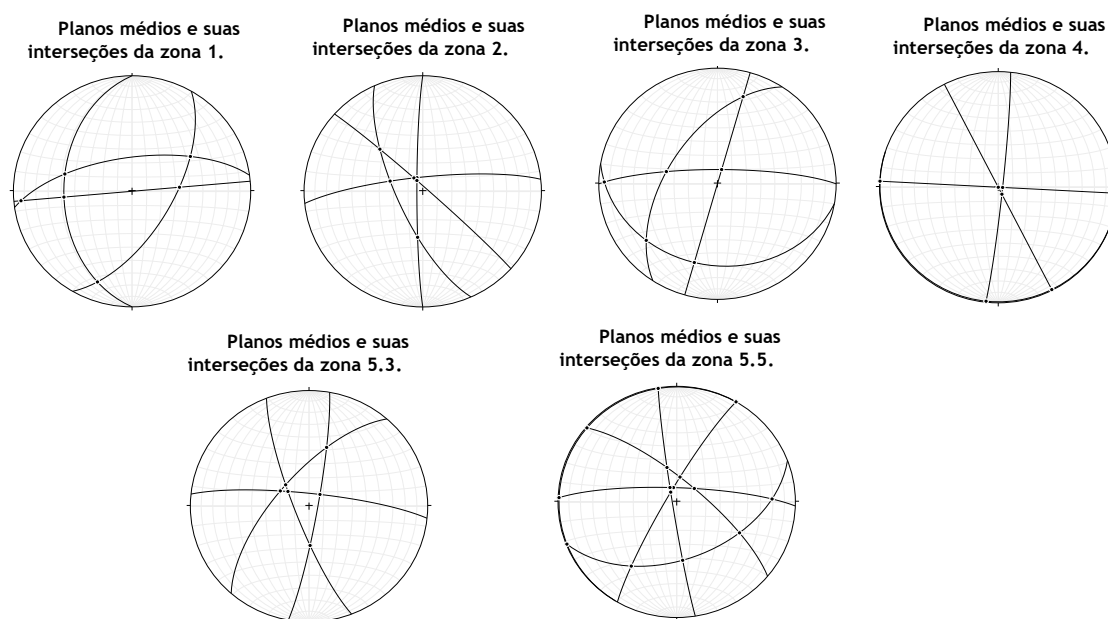


Figura 99 - Planos médios e possíveis linhas de interseção para cada zona cartografada.

Um fator a considerar na discussão dos resultados é que as descontinuidades são frequentemente cartografadas em superfícies rochosas de taludes onde a sua continuidade é superior à dimensão da superfície de observação, não sendo por isso possível medir o comprimento representativo da persistência (ou continuidade).

O espaçamento individual das descontinuidades e o número de famílias apresentam também uma elevada influência nas características de permeabilidade do maciço e nas condições de percolação. Regra geral, a condutividade hidráulica de uma dada família varia na razão inversa do espaçamento (Pereira, 2007).

Quando nos maciços rochosos se caminha em profundidade, verifica-se um aumento da pressão existente, sendo, portanto, comum existir um aumento do espaçamento das diáclases, não favorecendo a condutividade hidráulica. O espaçamento à superfície resulta da descompressão a que os maciços normalmente se encontram sujeitos, próximo da mesma, como consequência da sua meteorização e da erosão. Desta forma, compreende-se que descontinuidades próximas favorecem a condutividade hidráulica.

A interconetividade dos planos médios ocorre apenas caso eles se cruzem em profundidade, proporcionando a infiltração da água pela rocha.

Na tabela 16 encontram-se os valores dos pontos de interseção entre planos médios para cada zona considerada.

Tabela 16 - Pontos de interseção entre as famílias de cada zona.

Tendência	Mergulho	Tendência	Mergulho	Tendência	Mergulho	Tendência	Mergulho	Tendência	Mergulho	Tendência	Mergulho
200,4	17,4	337,6	79,6	270,9	5,2	273,0	3,0	42,3	78,9	272,2	0,9
58,5	41,9	287,8	66,4	16,0	79,6	93,0	87,0	298,5	67,5	30,0	0
Zona 1 85,0	57,0	Zona 2 327,4	78,8	Zona 3 283,8	53,4	Zona 4 90,0	90,0	Zona 5.3 305,6	72,2	Zona 5.5 310,3	1,0
265,0	6,7	186,2	57,2	196,0	29,9	185,9	1,0	16,3	46,0	351,0	0,6
284,8	41,0	332,4	81,4	230,8	23,6	153,0	0,7	178,5	62,2	248,5	0,6
265,0	41,9	315,3	47,4	16,0	22,7	153,0	84,5	33,1	68,0	347,6	79,7

Como já referido anteriormente, o aparecimento das águas encontra-se situado numa depressão, de orientação NE, na vertente E. Esta depressão, após análise efetuada

anteriormente, corresponde a uma área fortemente tectonizada e que se encontra coberta por depósitos colúvio-aluvionares parcamente densos.

Na zona 1, as possibilidades de entrada são bastante reduzidas. A área apresenta valores de mergulho baixos, o que indica uma baixa continuidade em profundidade.

A zona 2 é a zona que mais possibilidades de infiltração de água. O predomínio do espaçamento à superfície entre fraturas medianamente afastadas, podendo ir de próximas a afastadas, proporciona um aumento da condutividade hidráulica. Tendo em conta ainda a persistência, esta é baixa à superfície. No entanto, e considerando os valores de mergulho para as tendências de cada família de fraturas, existe uma forte possibilidade de continuidade em profundidade. A entrada de água nesta zona é ainda denunciada pela presença de minerais de argila, quartzo no preenchimento das diáclases. A presença da alteração metassomática nas paredes das diáclases revela a possibilidade de ascensão dos fluidos hidrotermais, denunciando a possibilidade de estas apresentarem abertura e continuidade em profundidade.

A projeção da atitude dos planos médios e a observação da atitude das diáclases observadas junto do rio Côa, demonstram que os planos dominantes na zona 2 são os mesmos que possibilitam a infiltração de água do rio, caso ocorram alterações no equilíbrio hidrodinâmico águas superficiais - águas subterrâneas (figura 100).



Figura 100 - Evidência dos planos dominantes na zona 2 (a vermelho) e do nó tectónico entre a falha principal e a termal (a preto) (fonte: Google Earth - 3/11/2017).

Relativamente à zona 3, esta apresenta algumas possibilidades de infiltração, uma vez que algumas descontinuidades apresentam aberturas elevadas, embora o predomínio seja para estas se encontrarem fechadas. O espaçamento, verificado à superfície, entre fraturas varia entre muito afastadas a afastadas, sendo esta última a que predomina, dificultando a infiltração. A persistência verificada à superfície é muito baixa a baixa, e atentando para os valores dos mergulhos para as tendências das famílias registadas, verifica-se que continuidade em profundidade não será muito elevada. Verificam-se paredes completamente oxidadas, podendo ser indicador do fenómeno de escorrência.

A zona 4 apresenta grandes possibilidades de infiltração de água, uma vez que se verificou a presença da mesma, sobre a forma de gotejamento ocasional, aquando o seu mapeamento. O espaçamento entre fraturas à superfície é favorável à infiltração, uma vez que se verifica o predomínio das fraturas medianamente afastadas, podendo, no entanto, ir de próximas a afastadas. A persistência verificada situa-se entre baixa a média. Os valores de mergulho para as tendências consideradas apresentam valores extremos, variando entre valores baixos para valores altos, denunciando a continuidade de algumas famílias de fraturas em profundidade.

No que à zona 5.3 diz respeito, esta apresenta fortes possibilidades de infiltração de água. O espaçamento entre fraturas verificado à superfície é propício à infiltração, estando contido no intervalo de mediantemente afastadas a próximas. Na superfície, registam-se continuidades baixas, mas considerando os valores dos mergulhos para as tendências das famílias, existe uma forte probabilidade de continuidade em profundidade. Nesta zona, as fraturas encontram-se preenchidas por minerais de argila e grãos de quartzo, o que denuncia a possível infiltração da água. Nesta zona, verifica-se também a presença de metassomatismo ao longo das paredes das diáclases, indicando a probabilidade de ascensão de fluídos hidrotermais. Ora, isto indica a possibilidade da existência de abertura e continuidade em profundidade.

Relativamente à zona 5.5, apresenta baixas probabilidades de infiltração de água. O predomínio das fraturas mediantemente afastadas, podendo ir, a afastadas à superfície, não favorece a infiltração. Ainda à superfície, verifica-se uma continuidade muito baixa, a baixa; considerando os valores de mergulho para as respetivas tendências, verifica-se que estes são muito baixos, praticamente nulos, sugerindo a não existência da continuidade das fraturas em profundidade.

Junto da zona 2, localiza-se a nascente tradicional que é condicionada pelo nó tectónico entre a falha termal e a falha encaixante do rio Côa, de orientação WNW-ESE, respetivamente, paralela à Falha do Côa-Sabor. Neste local, existem três furos - AC1, FS2 e AQ1.

O furo AC1 cortou uma fratura de descompressão, embora que em profundidade. Atualmente, este furo encontra-se selado, devido a contaminações bacteriológicas.

Relativamente à geomorfologia, importa destacar que a região se encontra inserida numa extensa zona aplanada, de cotas médias de 700 a 750 metros, sendo que abaixo desta mesma zona, a cotas cerca de 200 metros inferiores, corre o rio Côa.

O declive do rio é muito pequeno, cerca de 0,5%, o que condicionado com o encaixe do vale, praticamente em cunha, (figuras 35 e 36), conduz à formação, abundante, de aluviões argilo-arenosos e de idade recente. Estes depósitos vão permitir a acumulação de águas superficiais, interferindo no circuito de águas emergentes.

A captação da água mineral de Fonte Santa, foi, até 2016, efetuada por dois furos profundos, FS2 e AQ1. O furo FS2 foi efetuado à cota de 509,57 metros, possuindo uma profundidade de 120 metros; o nível hidrostático alcançado por este é de -7,20 metros. O furo AQ1 foi efetuado à cota de 526,45 metros e tem uma profundidade de 931,30 metros; o nível hidrostático atingido é de -32,75 metros. Considerando que os furos atuais apenas distam 250 metros, o local do furo FS2 poderá ser um local de mistura de águas superficiais, provenientes do rio e da precipitação, com as águas do aquífero termal, explicando a captação de água a tão pouca profundidade. A provável mistura de águas leva também a um condicionamento da qualidade da água do aquífero mineral, explicando assim a perda de sulfuração do mesmo, um problema detetado ao longo das análises químicas efetuadas.

Capítulo 7.

Conclusões e perspectivas futuras

7. Conclusões

Considerando as conclusões que foram obtidas e referidas ao longo desta dissertação, torna-se importante evidenciar as grandes conclusões que resultam do trabalho executado.

Importa aqui ressaltar o contributo da estatística circular no estudo de dados geológicos, demonstrando que esta abordagem do tratamento estatístico dos dados da direção e inclinação das estruturas geológicas regionais, é apropriada.

Considerando o que foi efetuado ao longo deste trabalho, e recorrendo aos resultados conseguidos pelos recursos estatísticos, fica comprovado que é viável estabelecer uma associação entre os indicadores estatísticos e as interpretações do modelo hidrogeológico local.

Exemplo do que foi supracitado é a causa proximidade vs afastamento das zonas à grande falha principal, que é demonstrado de forma evidente, nos indicadores estatísticos, nomeadamente nas medidas de dispersão e concentração. Assim, quanto maior for a distância da zona em estudo relativamente à falha principal, maior é a dispersão dos dados. Este fenómeno apresenta também evidências nos testes de ajustamento, particularmente no ajustamento à lei de distribuição de von Mises, onde se constata que o aumento da incerteza apresenta uma relação direta com o aumento da distância à grande falha principal.

As ferramentas estatísticas usadas permitiram demonstrar que não só é possível comprovar a orientação geral e a inclinação média das diáclases em estudo, como também identificar a variabilidade intrínseca aos mesmos dados.

No que diz respeito aos testes de ajustamento, particularmente, aos que pressupõem a hipótese da uniformidade distribucional dos dados, formam importantes indicadores de possíveis direções e inclinações preferenciais das diáclases. No entanto, para todos os dados considerados, a hipótese nula que pressupõe estes mesmos testes, foi rejeitada. De outra forma, a justeza de aproximações dos dados à distribuição de von Mises, conhecida distribuição teórica, permitem a abordagem probabilística dos dados analisados.

Após a recolha o reconhecimento geológico efetuado na área envolvente às termas de Fonte Santa, verificou-se que a orientação dos locais de amostragem não permitiu uma inspeção visual cuidada, condicionando a obtenção do mesmo número de medições para as diferentes famílias de diáclases. Importa ainda realçar que foram encontradas evidências e efetuadas colheitas de informação relativamente à família de diáclases subhorizontal; contudo, não foi possível recolher dados suficientes para uma correta caracterização da mesma, pela orientação dos locais.

Para uma melhor compreensão da rede de fraturação dominante na compartimentação dos maciços rochosos das áreas envolventes às termas de Fonte Santa, elaborou-se um esboço geotécnico de superfície, apresentado anteriormente. Deste zonamento geotécnico resultaram as seguintes unidades:

- ZG1: Engloba as zonas 1, 3 e 5.5, onde o granito se encontra pouco a muito alterado (W_1 a W_4); grau de fraturação baixo a médio (F_1 a F_4); continuidades muito baixas;
- ZG2: Engloba as zonas 4, 5.3 e 2, onde o granito se encontra pouco alterado a muito alterado (W_1 a W_4); grau de fraturação elevado a médio (F_2 a F_4); continuidades baixas.

O aquífero em causa é do tipo de circulação fissural profunda, aproximadamente 3000 metros, pelo que a sua recarga é efetuada através da Meseta, com água meteórica. A Meseta

Ibérica encontra-se fraturada, com visível aumento da sua intensidade conforme nos aproximamos para o rio Côa.

As diferentes áreas revelam a importância do afastamento ou proximidade à zona mais tectonizada (furo FS2) de uma rede de diáclases mais apertada. Exemplo disso mesmo são as áreas da zona 2 e 5.5, onde é observável uma rede de diaclasamento mais apertada, com presença de alteração de granito pelos processos metassomáticos.

O desenvolvimento em profundidade de fraturação define os circuitos hidráulicos; esse desenvolvimento proporciona um gradual aquecimento da água meteórica, que se infiltra na extensa Meseta, através do gradiente geotérmico, do calor gerado pelas próprias tensões de fratura e/ou através de processos de decaimento de isótopos instáveis presentes em minerais das rochas graníticas.

É plausível considerar que na região de Almeida, ocorrem as seguintes unidades hidrogeológicas com as seguintes características:

- Formações graníticas, onde se incluem as rochas de baixa permeabilidade e características e alimentação ao aquífero más. Importa realçar que as características geomorfológicas das vertentes do rio Côa, favorecem a escorrência ao invés da infiltração, contribuindo em muito pouco para o potencial hidrogeológico do local;
- Formações aluviais do rio Côa, rochas de permeabilidade elevada, sendo aqui o local provável de alimentação lateral do Côa, aumentando assim a possibilidade de formação de aquíferos, comportando na área as únicas formações com potencial hidrogeológico compatível com uma exploração.

Do estudo geológico-geotécnico efetuado, resultam as seguintes considerações:

- Fácies graníticas de grão grosseiro, biotítico.
- Reconhecimento de uma forte rede de fraturação e de falhas geológicas regionais, de orientação média NNE-SSW e WNW-ESE e da falha termal de orientação NNW-SSE;
- A rocha apresenta um grau de fraturação médio a elevado - F_1 a F_4 ;
- De forma global, o maciço pode ser classificado como mediamente alterado (W_3) a muito alterado (W_4);
- As diáclases, em termos de continuidade, apresentam um aumento conforme se caminha para em direção ao rio;
- Esta abordagem possibilitou uma proposta de zonamento geotécnico do georrecurso na tentativa de auxiliar o planeamento da gestão racional do aquífero, permitindo concluir que a zona 2 não é considerada como local ideal para a execução do novo furo, uma vez que existe elevada probabilidade de infiltração de águas superficiais.

7.1. Perspetivas futuras

Devido às condições do terreno e também por falta de tempo, não foi possível recolher e analisar mais dados e ir um pouco mais longe, de forma a obter o mesmo número de registos para cada zona. Deste modo e em desenvolvimentos futuros, seria interessante conseguir mais registos, se as condições encontradas o permitirem.

Novos dados permitiriam confirmar a vantagem do uso dos indicadores estatísticos conseguidos e até mesmo, verificar a sua utilidade na generalização interpretativa de fenómenos geológicos, interligando, desta forma, a geologia e a estatística.

Assim, e caso os novos dados sejam concordantes com os já obtidos neste estudo, poderá usar-se a metodologia aqui seguida na interpretação de modelos hidrogeológicos, de forma complementar.

Capítulo 8.

Bibliografía

8. Bibliografia

- Aldeias Históricas de Portugal. (2015). <http://www.aldeiashistoricasdeportugal.com>, consultado em 30/03/2017.
- Azevedo, M. & Aguado, B. (2006). *Origem e instalação de Granitóides Variscos na Zona Centro-Ibérica*. In: Dias, R.; Araújo, A.; Terrinha, P. & Kullberg, J.C (Eds.)- *Geologia de Portugal*, vol. I, Escolar Editora, Lisboa, 376, 401, Portugal.
- Barbosa, S. (2013). *Estatística para dados direccionais, Análise de dados em Geociências*, Mestrado em Ciências Geofísicas 2013-2014, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Barros, A. J. L. S. (2016). *Contributo da estatística circular no estudo (direção e inclinação) de planos e linhas de estruturas geológicas*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente), Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Bell, F. G. (1993). *Engineering Geology*. Cambridge: BlackWell Scientific Publications, Inglaterra.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Classifications*. Estados Unidos da América.
- Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics for underground mining*. 3rd Edition, George Allen & Unwin, Londres. 527 pp.
- Capdevilla, R. & Floor, P. (1970). *Les différents types de granites hercyniens et leur distribution dans le nord ouest de l'Espagne*. Boletín Geológico y Minero, 215-225, Espanha.
- Carvalho, J. F. S. (2010). *Estudo da Fracturação de um Maciço Rochoso Granítico para uma possível Implementação de Pedreira de Rocha Ornamental*. (Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Minas), Universidade do Porto, Porto.
- Chaminé, H. I. & Gaspar, A. F. (1995). *Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica da amostragem linear*. Aplicação a uma travessa da Mina de Carvão de Germunde Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., Porto, 37: 97-111.
- Cohen, J., Cohen P., West, S. G. & Aikens, L. S. (2003). *Applied multiple regression/correction analysis for the behavioral sciences*. (3 rd ed.) Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cortez, J. A. S. (2013). *Plano de Exploração - Fonte Santa de Almeida*. S. Mamede de Infesta, Portugal.
- Davis, J. C. (2002). *Statistics and data analysis in geology* (3 ed.). Kansas, Estados Unidos da América: John Wiley & Sons.
- Dinis da Gama, C. (1995). *Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de Canteras*. In: López Jimeno, C. (Ed.). Cap. 10 del Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico. S.L., Madrid, Espanha. pp. 231-246.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M. L. (1987). *Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu Enquadramento Geodinâmico*. in: Bea, F., Carnicer, A., Gonzalo, J. C., López Plaza, M. & Rodriguez Alonso, M.D. (Eds). *Geologia de los Granitoides e Rocas Asociadas del Macizo Hespérico*, Editorial Rueda, Madrid, 37-51.
- Ferreira, A. M. P. J. (2000). *Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de doutor em Geociências), Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Fiúza, A. (2003). *Aquisição e Análise de Dados*. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fisher, N. I., (1993). *Statistical analysis of circular data*. Cambridge University Press, Cambridge, 277 pp, Inglaterra.

- Fontinhas, A. M. P. (2012). *Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauwagues da Formação de Mértola*. (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica - Geotecnia), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Fossen H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, Reino Unido
- Gama, A., Smit, H., Berliner, A., Figueiredo, F., Gaspar, P., Garzón, J., Maia, M., Marques, H. S. & Cosme, J. (2010). *Planos de Gestão: Área Protegida Privada Faia Brava 2009-2019*. Associação Transumância e Natureza, 218 pp.
- Giani, G. P. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*. Roterdão, Holanda: A.A. Balkema Publishers.
- Góis, J. E. S. (2002). *Contribuição dos modelos estocásticos para o estudo da climatologia urbana*. (Dissertação apresentada para a prestação de provas de doutoramento), Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Goodman, R. R (1976). *Methods of geological engineering in discontinuous rocks*. West Publishin, 472 pp. Estados Unidos da América.
- Hatcher, R. D. (1995). *Structural Geology: Principles, Concepts, and Problems*. 2nd Edition, Prentice - Hall, Estados Unidos da América.
- Hoek, E. & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy. Londres, Inglaterra.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy. Londres, Inglaterra.
- Hudson, J. A. & Priest, S. D. (1983). *Discontinuity frequency in rock masses*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 20: 73-89.
- Instituto Nacional de Estatística (2001). *Censos 2001 - resultados definitivos : XIV recenseamento geral da população: IV recenseamento geral da habitação*. Instituto Nacional de Estatística. 8 vol. Lisboa, Portugal.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2017). <http://www.ipma.pt/>, consultado em 4/4/2017.
- ISRM. (1978). Suggested Methods For The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15, 319-368.
- ISRM. (1981). *Basic geotechnical description of rock masses (BGD)*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18, 87-110.
- Lima, C., Menezes, J. & Gomes, A. T. (2012). *Textos de Apoio de Geologia de Engenharia*. Universidade do Porto, Porto.
- Loczy, L. & Ladeira, E. A. (1980). *Geologia estrutural e introdução a geotectónica*. São Paulo: E. Blucher. 528 p. il.
- Matias, O., Martins, P., Dias, A. G., Guimarães, P. & Rocha, P. (2004). *Geologia 11*. Porto, Portugal. Areal Editores.
- Mardia, K. V. & Jupp, P. E. (2000). *Directional Statistics*. Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Martins Carvalho, J. (1979). *Estudo Hidrogeológico do Aquífero Mineral de Almeida*. Sondagens e Fundações A. Cavaco, Lda, 22 pp.
- Martins R., Moreira P., Santos P., Neto E., Pereira A. M., Teixeira J., Vieira A. & Chaminé H. I. (2006). *A técnica de amostragem linear aplicada a estudos de compartimentação de maciços rochosos no Norte de Portugal*. In: Actas do 10^o Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia /Univ. Nova de Lisboa, maio de 2006. Volume 1, pp. 255-264.
- Martins, A. P. (2011). *Cartografia Geotécnica Subterrânea do Maciço Granítico de Arca D'Água (setor de Carvalhido-Burgães): implicações para o modelo geomecânico comportamental*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente), Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.

- Martínez Catalán, J. (1985). *Estratigrafia y estructura del Domo de Lugo (Sector Oeste de la Zona Asturoccidental-leonesa)*. Corpus Geologicum Gallaeciae (2ª serie), Fundacion «Pedro Barrie de la Maza, Conde Fenosa», Coruña.
- Miranda, M. M., Lamas, R., Matos, C., Rodrigues, N.V., Pereira, A.J.S.C., Neves, L.J.P.F. & Costa, J.J. (2016). *A importância do estudo de sondagens profundas para investigações de potencial geotérmico: o caso da sondagem profunda de Almeida (Guarda, Portugal central)*.
- Monteiro, R. I. M. R. (2008). *Estudo geológico e geotécnico de taludes rochosos em S. Pedro da Afurada (Vila Nova de Gaia): contributos para a avaliação da estabilidade estrutural*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- Peacock, D. C. P. (2006). *Predicting Variability in joint frequencies from boreholes*. J. Structural Geology, 28: 353-361.
- Peacock, D. C. P., Harris, S. D. & Mauldon, M. (2003). *Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies*. J. Struct. Geol., 25: 109-119.
- Pereira, C. M. S. (2007). *Compartimentação de maciços pela técnica de amostragem linear: o caso da pedreira da Mimosa*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Minerais e Rochas Industriais), Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Pereira, J. J. C. P. (1985). *Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Mecânica dos Solos), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Peixoto, L. J. S. (2008). *O Património Geomorfológico-Glacial do parque Nacional de Peneda Gerês: Proposta de Estratégia de Geoconservação*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Património Geológico e Geoconservação), Universidade do Minho, Minho
- Priest, S. D. (1980). *The use of inclined hemisphere projection methods for the determination of kinematic feasibility, slide direction and volume of rock blocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 17, 1-23.
- Priest, S. D. (1985). *Hemispherical projection methods in rock mechanics*. Allen & Unwin, 128 pp. Londres, Inglaterra.
- Priest, S. D. (1993). *Descontinuity Analyses for Rock Engineering*. Chapman & Hall, 473 pp. Inglaterra.
- Priest, S. D. & Hudson, J. A. (1981). *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 183-197.
- Portaria nº119/2016 in: Diário da República n.º 84/2016, Série I de 2016-05-02, pp 1466-1467.
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D. & Monteiro, J. H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal, 114pp.
- Rodrigues, E. S. F. (2013). *Análise da estabilidade de dois taludes rochosos graníticos*. (Dissertação apresentada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Geológica), Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Sá, J. P. M. (2007). *Applied Statistics Using SPSS, Statistica, Matlab and R* (2 ed.). Springer. Portugal.
- Scesi, L. & Gattinoni, P. (2009). *Water circulation in rocks*. Springer, Dordrecht, 165 pp.
- Singhal, B. B. S. & Gupta, R. P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fratured Rocks* (2 ed). Springer, Holanda.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., Pilar, L., Lopes, J. T. & Rocha, A. T. (1959). *Carta Geológica de Portugal 1/50000, Notícia Explicativa da Folha 18-B, Almeida*. Lisboa, Portugal.

- Twiss, R. J. & Moores, E. M. (1992). *Structural Geology*. Estados Unidos da América: W. H. Freeman and Company.
- Vallejo, L. I. G, Ortuño, M. F. L, Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (I. Capella Ed.). Madrid, Espanha: Pearson Educación.

Anexos

Ficha de campo - Termas da Fonte Santa - 2017

Data: ____/____/2017		Nome:		Instituição:	
Localização:		Foto:		Tipo de Afloramento:	
Coordenadas:		Condições climáticas:		Hora:	

Estação número		Atitude					Grau de alteração (de acordo com a norma ISRM)					Fraturação					Espaçamento entre descontinuidades (mm)						Hidrogeologia					Observações
		Direção			Inclinação		W1-2	W3	W4-5	F1-3	F3-10	F10-30	F30-60	F>60	E20-60	E60-200	E200-600	E600-2000	E2000-6000	E>6000								
							Rocha sem ou com poucos sinais de alteração	Rocha medianamente alterada	Rocha muito alterada ou decomposta	Muito grandes	Médias	Pequenas	Muito pequenas	Muito brechificadas	Muito juntas	Juntas	Moderadamente juntas	Separadas	Muito separadas	Extremamente separadas						Sem presença de água	Seco - com sinais de água		Húmido	A gotejar	A fluir
(m)	N	(°)	E	(°)	Q																							

